

**MAGNETRON PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE SrTiO₃ İNCE
TABAKALARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Mutlu DEMİR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2013

ANKARA

Mutlu DEMİR tarafından hazırlanan “MAGNETRON PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE SrTiO_3 İNCE TABAKALARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Tofiq MEMMEDLİ

Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İleri Teknolojiler Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İman ASKERBEYLİ

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Prof. Dr. Tofiq MEMMEDLİ

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 05/07/2013

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yaptığımı bildiririm.

Mutlu DEMİR

MAGNETRON PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE SrTiO₃ İNCE TABAKALARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Mutlu DEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2013

ÖZET

Bu tez çalışmasında, SrTiO₃ ince tabakaların üretimi ve karakterizasyonları araştırıldı. Yöntem olarak ise (RF) Püskürtme yöntemi kullanıldı. Alttaş olarak n-tipi silisyum (Si) üzerine SrTiO₃ ince tabaka büyütülerek, elektriksel karakterizasyonu araştırıldı. SrTiO₃/n-Si yapıların, frekansa ve sıcaklığa bağlı kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) karakteristikleri seri direnç (R_s) ve arayüzey durumlarının (N_{ss}) etkisi dikkate alınarak 80-300 K sıcaklık aralığında ve 10 kHz-1MHz frekans, (-5 V)-(+5 V) aralığında incelendi. Yapının deneysel C-V-f ve G/w-V-f karakteristiklerinin frekansa ve sıcaklığa bağlı olduğu gözlemlendi. Frekansa ve voltaja bağlı R_s ve N_{ss} incelendi. Buna ilaveten ara yüzey durumlarının dağılım profili (N_{ss}), etkin bariyer yüksekliği (Φ_e) göz önüne alınıp enerjinin (E_c-E_{ss}) bir fonksiyonu olarak doğru ön gerilim I-V ölçümlerinden elde edildi. Arayüzey durumlarının ortalama değeri 10¹⁴ eV⁻¹cm⁻² civarında bulundu. C-V eğrilerindeki pikler N_{ss} ve R_s'nin varlığına atfedildi. R_s'nin C-V ve G/ω-V karakteristiklerine etkisi yüksek frekanslarda daha fazladır çünkü C ve G/ω değerleri artan frekansla azaldığı görüldü. N_{ss}'nin varlığı bu tür yapıların C-V ve G/ω-V eğrilerinin ideal durumdan sapmasına yol açtığı görüldü. Ara yüzey durumları özellikle düşük frekanslarda a.c. sinyali kolayca takip edebilir ve ömürlerine bağlı olarak kapasitansa katkıda

bulunurlar. Aynı zamanda C-V ve G/ω -V eğrilerinde görülen pik değerlerinin voltaj ekseninde kaymasına neden olurlar.

Bilim kodu : 202.1.008
Anahtar Kelimeler : MIS yapı; MFS yapı; I-V; C-V-f; G/ω -V-f; Arayüzey durumları; Seri direnç; elektriksel ve dielekrik zellikler
Sayfa adedi : 64
Tez yöneticisi : Prof. Dr. Tofig MEMMEDLİ

**PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF SrTiO₃ THIN FILMS BY
MAGNETRON SPUTTERING**

(M. Sc. Thesis)

Mutlu DEMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2013

ABSTRACT

In this study, we investigated the production and characterization of SrTiO₃ thin films. (RF) Magnetron sputtering method was used. The n- type silicon substrate (Si) on the Radio frequency (RF) electrical characterization of SrTiO₃ thin films deposited on n type Si substrate. SrTiO₃/n-Si structures, Frequency dependent capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G/ω-V) characteristics have been investigated by considering the effect of series resistance (R_s) and interface states (N_{ss}) in the frequency range of 10 kHz – 1 MHz and between 80-300 K temperature. The experimental C-V-f and G/ω-V-f characteristics of these structures show fairly large frequency dispersion, especially at low frequencies. The frequency and voltage dependent distribution profile of R_s and N_{ss} were obtained by using admittance spectroscopy and Hill-Coleman methods, respectively. In addition, the energy density of N_{ss} distribution profiles as a function E_c-E_{ss} was extracted from the forward bias I-V characteristics by taking into account the bias dependence of the effective barrier height (Φ_e). The average value of interface states was found about 10¹⁴ eV⁻¹cm⁻². The C-V plots exhibit anomalous peaks due to the N_{ss} and R_s effect. Also, the effect of R_s on the C-V and G/ω-V characteristics is found appreciable at higher frequencies due to decreasing values of C and G/ω with increasing frequency. Because of the presence of N_{ss}, the device behavior is

different from the ideal case of C-V and G/ω -V characteristics. These N_{ss} can easily follow the a.c. signal especially at low frequencies and yield an excess capacitance, which depends on their relaxation time and cause a bias shift of the C-V and G/ω -V curves.

Science Code : 202.1.008
Key words : MIS structure; MFS structure; I-V; C-V-f; G/ω -V-f; Interface states; Series resistance ; Electrical and dielectric properties
Page number : 64
Adviser : Prof. Dr. Tofiq MEMMEDLI

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın oluşmasında her konuda yardımını esirgemeyen veengin tecrübelerinden faydalandığım değerli tez danışmanı Hocam Prof. Dr. Tofig MEHMEDLİ'ye ve Gazi üniversitesi Fotonik Araştırma ve uygulama merkezi kurulmasında ve tezimin oluşmasında verdiği desteklerden ötürü Prof.Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarında manevi desteğini esirgemeyen sevgili arkadaşım Umut AYDEMİR'e Bir parçası olmaktan gurur duyduğum TÜV SÜD TEKNİK GÜVENLİK VE KALİTE DENETİM TİC. LTD. ŞTİ.'nin Genel Müdürü Sayın Rıfat PERGEL'e özellikle beni her konuda destekleyen Ankara Bölge Müdürü Sayın M. Koray EFE'ye ve TÜV SÜD Türkiye ailesine çalışmalarım konusunda bana sunmuş oldukları imkân ve desteklerinden ötürü teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	3
2.1. Metal Yalıtkan Yarıiletken (MIS) Kontaklar	4
2.2. İdeal MIS Yapısı	5
2.2.1. Yığılım	9
2.2.2. Tükenim	10
2.2.3. Tersinim	11
2.3. Gerçek MIS Yapısı.....	12
2.3.1. İyonlaşmış tuzaklar	13
2.3.2. Sabit oksit ve arayüzey yükleri	14
2.3.3. Arayüzey durumları	16
2.3.4. Hareketli iyonlar.....	19
2.4. MIS Diyotlarda Arayüzey Durum Yoğunluğu Teorisi	19
2.5. Ferroelektrik Malzemeler ve Özellikleri.....	24

Sayfa

2.6 SrTiO ₃ Kristal Yapısı.....	27
2.7. Metal-Ferroelektrik-Yarıiletken (MFS) Yapı	2430
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	33
3.1. SrTiO ₃ /n-Si (MFS) Yapıların Hazırlanması	33
3.1.1. Kristal temizleme	33
3.1.2. Yalıtkan stronsiyum titanat (SrTiO ₃) tabakasının RF püskürtme yöntemiyle oluşturulması	33
3.1.3. Omik kontakın oluşturulması.....	36
3.1.4. Doğrultucu kontakın oluşturulması.....	38
3.2. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri	40
4. DENEYSEL SONUÇLAR	41
4.1. Giriş.....	41
4.2. Akım-Voltaj (I–V) Karakteristikleri	41
4.3. Frekansa Bağlı Kapasite-Voltaj (C–V) ve İletkenlik-Voltaj (G/ω–V) Karakteristikleri	51
5. SONUÇ	56
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	64

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Au/SrTiO ₃ /n-Si büyütülmesine dair temel parametreler.....	36
Çizelge 4.1. Au/SrTiO ₃ /n-Si yapısı için 80-300 K sıcaklık aralığında doğru ön gerilim I-V verilerinden elde edilen bazı temel parametrelerinin değişimi.....	47
Çizelge 4.2. 500 kHz Frekansında Au/SrTiO ₃ /n-Si yapısı için C-V karakteristiklerinden elde edilen bazı temel parametreler.	55

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. MIS yapının şematik gösterimi	4
Şekil 2.2. $V=0$ 'da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken	5
Şekil 2.3. MIS kapasitansının eşdeğer devresi	8
Şekil 2.4. $V \neq 0$ durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması (a) Yığılım, (b) Tükenim, (c) Tersinim.....	9
Şekil 2.5. İdeal bir MIS yapının devre şeması (a) Yığılım, (b) Tükenim, (c) Tersinim	12
Şekil 2.6. İdeal olmayan MIS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması.....	13
Şekil 2.7. p tipi ve n tipi MIS yapı için pozitif veya negatif sabit oksit yüklerine göre voltaj eksenini boyunca C-V eğrilerinin değişimi.	15
Şekil 2.8. MIS yapısının eşdeğer devresi. (a) Bir enerji seviyesi için, (b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için	18
Şekil 2.9. Arayüzey tuzaklarının etkisini içeren eşdeğer devre	21
Şekil 2.10. MIS yapının eşdeğer devresi	22
Şekil 2.11. Ferroelektrik histerezis döngüsü	26
Şekil 2.12. $Sr(Ti/Zr)O_3$ kristalinin (a) Kübik ve (b) Tetragonal Fazdaki yapısı.....	30
Şekil 2.13. Metal-ferroelektrik-yarıiletken yapının şematik gösterimi	31
Şekil 2.14. Bir MFS yapı için farklı çalışma bölgeleri için enerji bant diyagramları	32
Şekil 3.1. (a) Ar^+ iyonlarının hedeften molekül sökmesi, (b) sökülen molekülün altaşa (substrate) yerleşmesi.	34
Şekil 3.2. Omik kontak oluşturulmasında kullanılan paslanmaz çelik maske	38
Şekil 3.3. Doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan 1 mm çaplı deliklere sahip paslanmaz çelik maske	38

Şekil	Sayfa
Şekil 3.4. Oluşturulan MFS tipi Au/SrTiO ₃ /n-Si yapının şematik gösterimi.....	39
Şekil 4.1 80-300 K sıcaklık aralığında Au/SrTiO ₃ /n-Si yapısının I – V eğrisi	44
Şekil 4.2. Au/SrTiO ₃ /n-Si yapısının idealite faktörü (n) ve etkin potansiyel (Φ _e) eğrileri	45
Şekil 4.3. 80-300 K sıcaklık aralığında Au/SrTiO ₃ /n-Si yapısının n _(v) – V eğrisi ..	46
Şekil 4.4. 80-300 K sıcaklık aralığında I - V ölçümlerinden elde edilen arayüzey durumlarının profili.....	49
Şekil 4.5. 80-300 K sıcaklık aralığında Au/SrTiO ₃ /n-Si yapının Cheung fonksiyonları	50
Şekil 4.6. 300 K sıcaklığında Au/SrTiO ₃ /n-Si yapısının 10 kHz- 1 MHz frekans aralığında ki C-V eğrisi.....	52
Şekil 4.7. Au/SrTiO ₃ /n-Si yapısının 10kHz- 1 MHz frekans aralığında G/w-V eğrileri	53
Şekil 4.8. Frekansa bağlı C ⁻² -V eğrileri.....	55

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. BESTEC firmasından alınan 3” ultra yüksek vakuma sahip püskürtme sistemi.	35
Resim 3.2. Püskürtme sisteminin yükleme odası ve yükleme rafları.....	35
Resim 3.3. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan vakumda buharlaştırma sistemi.....	37
Resim 3.4. Büyütülen MFS tipi Au SrTiO ₃ /n-Si yapı	39
Resim 3.5. Akım-gerilim ölçümleri için kullanılan deneysel ölçüm düzeneği	40
Resim 3.6. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan deneysel ölçüm düzeneği	40

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Alan
Å	Angstrom
A*	Richardson sabiti
A**	Etkin Richardson sabiti
C	Kapasitans
C_o	İlave kapasitans
C_{ox}	Yalıtkan tabakanın kapasitansı
C_{sc}	Uzay yükü kapasitansı
C_m	Ölçülen kapasitans değeri
C_c	Düzeltilmiş kapasitans değeri
E_a	Aktivasyon enerjisi
E_v	Değerlik (valans) bant kenarı enerjisi
E_c	İletkenlik bant kenarı enerjisi
E_F	Fermi enerjisi
E_{Fn}	n- tipi bir yarıiletkenin iletkenlik bandı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
E_g	Yarıiletken yasak enerji aralığı
ε_o	Boşluğun elektrik geçirgenliği
ε_i	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
ε_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
Hz	Frekans birimi (Hertz)
K	Termodinamik sıcaklık
k	Boltzmann sabiti
m*	Elektronun etkin kütlesi

Simgeler	Açıklama
m_0	Serbest elektron kütlesi
N_D	Verici yoğunluğu
N_A	Alıcı yoğunluğu
N_C	İletkenlik bandının etkin taşıyıcı yoğunluğu
N_V	Değerlik bandının etkin taşıyıcı yoğunluğu
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
Q_{sc}	Uzay yükü
q	Elektrik yükü
R_s	Seri direnç
Si	Silisyum
Ge	Germanyum
T	Mutlak sıcaklık
V	Gerilim
V_d	Difüzyon potansiyeli
V_F	Doğru beslem
V_{Fill}	Dolum voltajı
V_R	Ters beslem
V_y	Yalıtkan üzerine düşen gerilim
V_{yi}	Yarıiletken üzerine düşen gerilim
V_G	Metal plakaya uygulanan gerilim
V_o	Oksijen boşluğu
W_D	Tüketim tabakasının kalınlığı
Y	Admittans
Z	Empedans
Φ_B	Potansiyel engel yüksekliği
Φ_{Bo}	Sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_e	Etkin engel yüksekliği

Simgeler**Açıklama**

δ	Yalıtkan tabaka kalınlığı
Ω	Ohm
σ	Yakalama tesir kesiti
ρ	Öz direnç
χ_s	Elektron yakınlığı
Ψ_s	Yüzey potansiyeli
P_t	Sistem Basıncı
P_{Azot}	Azot Basıncı

Kısaltmalar**Açıklama**

a.c.	Alternatif akım
d.c.	Doğru akım
C-V	Kapasitans-voltaj
G/ω-V	İletkenlik-voltaj
I-V	Akım-voltaj
MS	Metal/yarıiletken
MIS	Metal/yalıtkan/yarıiletken
MFS	Metal/ferroelektrik/yarıiletken
STO	Stronsiyum titanat
BTO	Baryum titanat

1. GİRİŞ

İleri teknoloji ile donatılmış hassas araştırma cihazlarının geliştirilmesiyle deneysel olarak katıları oluşturan atomların ya da moleküllerin incelenmesi neticesinde malzeme üretim teknolojileri gelişmiş ve bilim bu konuda çok daha hızlı yol kat etmiştir. Katı malzemelerin fiziksel karakteristiklerini incelenmesi bilimin geçmişten bugüne kadar izlediği teorik ve deneysel çalışmaların ve modellemelerin sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Yapılan ilk teorik çalışmalar ile temeller atılmış ve bu temelleri atan önemli bilim insanları, ilk teorik çalışmalar da önemli modellemeler ortaya koymuştur. Bu modellemeler geliştirilerek band enerji seviyelerinin hesaplamalarının yapılabilmesi için farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemler günümüzde bilgisayar ortamında yapılan yazılımlar ile deneysel modelleme programları, bilim insanlarının yapmış oldukları deneysel çalışmalarını bilgisayar ortamında yapılan hesaplamalar ile önemli gelişme göstermiştir ve günümüzün teknolojisi ile malzeme teknolojisi önem kazanmıştır. Malzeme teknolojisinin önemli bir parçası olan yarıiletken malzemelerin üretimi bu çalışmalar içerisinde yer almış yapılan çalışmalar neticesinde önemli elektronik devrelerin geliştirilmesine imkân sağlanmıştır. Yarıiletken malzeme teknolojisi 21. Yüzyılda daha bir önem kazanmıştır. Yarıiletken malzeme teknolojisi içerisinde ise farklı özellik karakteristik özellik gösteren malzemeler bilim insanlarının dikkatini çekmiş ve bu özellikleri incelenerek farklı alanlara uygulanması noktasında önemli adımlar atılmıştır. Tez kapsamında SrTiO_3 İnce film tabakasının üretim teknikleri ve elektriksel karakterizasyonu araştırma konusu olarak seçilmiştir.

Bu çalışmada RF Magnetron püskürtme metoduyla $\text{Au/SrTiO}_3/\text{n-Si}$ (MFS) yapının temel elektriksel karakteristikleri 80-300 K sıcaklıklarında I-V, C-V ve G/ω -V deneysel ölçüm metotları kullanılarak belirlendi. C-V ve G/ω -V ölçümlerinden, arayüzey durumlarının etkisi frekansa ve sıcaklığa bağlı olarak incelendi.

Çalışma kapsamında, Shocttky diyotların teorisi ve çalışma prensibi, (MFS) yapıların hazırlanması ve kullanılan deneysel ölçüm sistemleri , deneysel ölçümler sonucunda elde edilen grafik ve tablolar mevcut literatür ile kıyaslamalı olarak incelenerek varılan sonuçlarla ilgili yorumlar ve tartışmalara yer verilmiştir.

2. TEORİK BİLGİLER

Metal yarıiletken tabakalar ile ilgili çalışmalar 1960'lı yıllarda ilgi görmeye başlamıştır. Bu yıllarda Schottky diyotların yapılması ile ilgili bir çok uygulamada gerçekleştirilmiştir [1,2]. Metal yarı iletken Schottky diyotların elektriksel iletkenlik özelliklerinden yeterince faydalanmak, uygun kontaklar hazırlanarak uygun elektronik devrelerde kullanılabilmesi için karakteristik parametrelerinin anlaşılabilmesi için yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin detaylı olarak incelenmesi gerekir [1-5]. Üretilen bir devre elemanın istenilen performansta çalışabilmesi, devre yapısına ait bütün özelliklerinin bilinmesi ve doğabilecek olumsuzlukların giderilmesine bağlıdır. Yarıiletken teknolojisinde, temel elektronik yapı elemanlarının fiziksel ve elektronik özellikleri hakkında araştırma yapmak önem taşımaktadır. Uzun yıllardır yarıiletken elemanlarından üretilen metal-yarıiletken yapıların araştırılmasında bir kısım araştırmacılar yarıiletken malzemelerin hazırlanması yönünde araştırma yaparken, bir bölümü ise yarıiletken malzemelerin elektronik özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerden faydalanarak yeni metal-yarıiletken devre elemanlarının geliştirilmesi konusunda çalışma yürütmektedirler [1-10]. Araştırma konusu yarıiletken malzeme hazırlanması ise, kristale uygun kontaklar alınarak Schottky diyot yapısının elde edilmesi gerekir. Yarıiletken kristal ile kontak yapılacak metal veya alaşımın olabildiğince düşük bir dirençle atomik boyutta temas etmeleri beklenir. Oluşturulan kantağın ideal olması için, kontak olarak kullanılan malzemelerin yüzeylerinin yeteri kadar temiz ve pürüzsüz olması gereklidir [66].

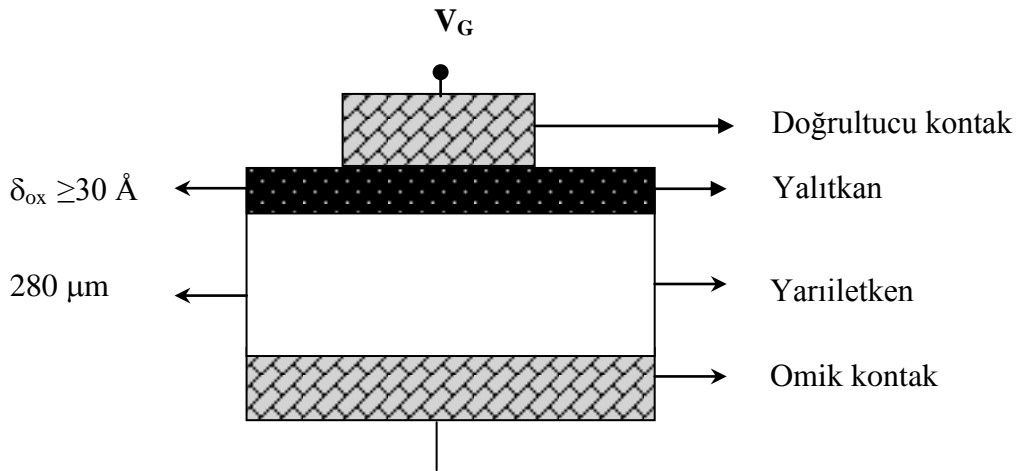
Metal ile yarıiletken kontak edildiğinde, termal denge kuruluncaya kadar metal ile yarıiletken kristal arasında yük geçişleri (difüzyon) meydana gelir. Metal ile yarıiletkenin Fermi enerji düzeyleri eşit oluncaya kadar hem metalden yarıiletkene hem de yarıiletkenden metale doğru yük alışverişi gerçekleşir [66].

Metal-yarıiletken kontaklar doğrultucu ve omik olmak üzere ikiye ayrılırlar. Kantağın omik veya doğrultucu olmasını, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları

belirler. Φ_m metalin iş fonksiyonu, Φ_s de yarıiletkenin iş fonksiyonu olmak üzere, metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda doğrultucu kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ durumunda ise omik kontak oluşur. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda ise $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda omik kontak ve $\Phi_s > \Phi_m$ durumunda da doğrultucu kontak oluşur [14,15,66].

2.1. Metal Yalıtkan Yarıiletken (MIS) Kontaklar

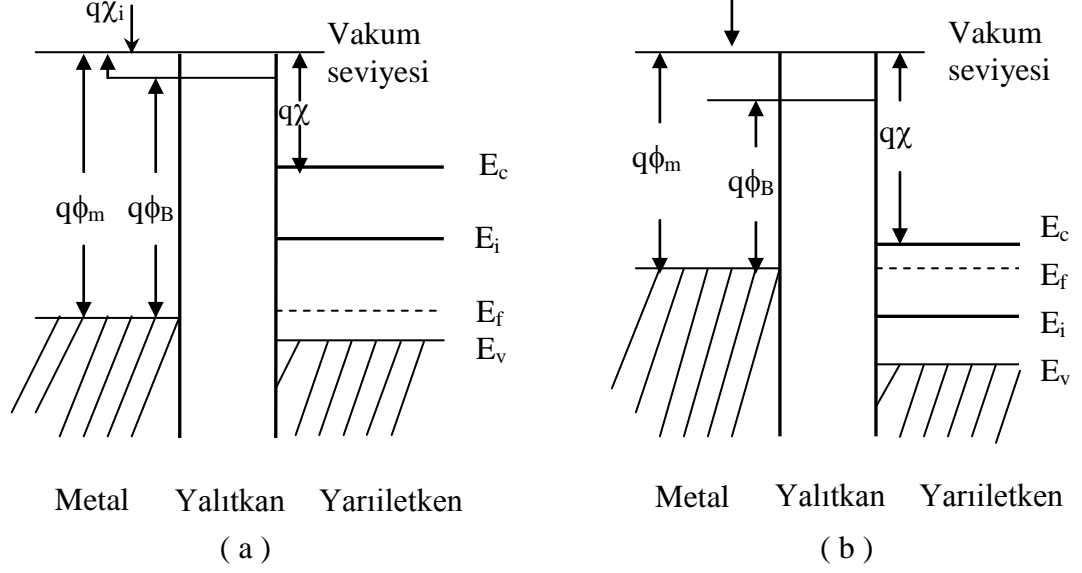
Metal ile yarıiletken arasında yalıtkan bir tabaka ister doğal yolla oluşsun ister deneysel yöntemlerle oluşturulsun metal/yarıiletken (MS) yapısını metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) yapısına dönüştürür [25-30]. Arada bir yalıtkan tabakanın varlığı metali yarıiletken sistemden ayırır ve böylece yarıiletkendeki ara yüzey durumları metaldeki elektron durumlarından izole edilmiş olur [25]. Bu durumda ara yüzey durumları yarıiletkenin Fermi seviyesi ile belirlenir. Şekil 2.1’de bir MIS yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Burada δ_{ox} yalıtkan oksit tabakanın kalınlığı ve V_G metal plakaya uygulanan gerilimdir. V_G gerilimi; metal plaka omik kontakta göre pozitif bir gerilim ile beslendiğinde pozitif, negatif bir gerilim ile beslendiğinde negatiftir. Bu yapının belirgin özellikleri paralel levhali kondansatörde olduğu gibi yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken ara yüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir [66].



Şekil 2.1. MIS yapının şematik gösterimi

2.2. İdeal MIS Yapısı

İdeal bir MIS yapıda sıfır voltajdaki enerji-bant diyagramı Şekil 2.2’de hem p- tipi hem de n-tipi için gösterilmiştir.



Şekil 2.2. $V=0$ ’da ideal bir MIS yapının enerji-bant diyagramı (a) p-tipi yarıiletken (b) n-tipi yarıiletken

ϕ_m : Metalin iş fonksiyonu

ϕ_s : Yarıiletkenin iş fonksiyonu

ϕ_B : Potansiyel engel yüksekliği

ϕ_n : n-tipi bir yarıiletkenin iletkenlik bandı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı

χ_s : Yarıiletkenin elektron yakınlığı

E_v : Valans (değerlik) bandı enerji seviyesi

E_c : İletkenlik bandı enerji seviyesi

E_f : Fermi enerji seviyesi

W_D : Tüketim tabakasının kalınlığı

Bazı temel tanımlar

Fermi enerjisi: İletkenlerde mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$ K), elektronlar tarafından taban durumundan itibaren işgal edilen en yüksekteki dolu seviyenin enerjisine denir. Yarıiletkenlerde ise iletkenlik ve valans bandındaki taşıyıcı sayısına ve sıcaklığa

bağlı olarak, yasak enerji bölgesinde yer alan izafi seviye *Fermi enerjisi* olarak tanımlanır. n tipi yarıiletkenlerde Fermi enerjisi iletim bandından itibaren ölçülürken p tipinde ise valans bandından itibaren ölçülür.

Vakum seviyesi: Bir metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi veya bir elektronu yüzeyden koparıp serbest hale gelmesi için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarı olup Şekil 2.2 de referans olarak alınmıştır.

Metalin iş fonksiyonu (ϕ_m): Bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak veya serbest hale getirmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır.

Yarıiletkenin iş fonksiyonu(ϕ_s): Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Fermi enerjisi katkılanan madde atomlarının yoğunluğu ile değiştiğinden dolayı ϕ_s de değişen bir niceliktir.

Elektron yakınlığı (χ): Vakum seviyesi ile iletkenlik bandı kenarı arasındaki bir elektronun enerji farkı olarak tanımlanır.

İdeal bir MIS yapıdaki özellikler aşağıdaki gibi tanımlanabilir [14,26,27];

- Sıfır beslem durumunda metalin iş fonksiyonu ϕ_m ve yarıiletkenin iş fonksiyonu ϕ_s arasındaki fark sıfırdır. Bir başka deyişle metal ile yarıiletken arasında ki iş fonksiyonu farkı sıfırdır. ($\phi_{ms}=\phi_m-\phi_s=0$) n-tipi ile p-tipi yarıiletken için şu şekilde verilir.

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_B \right) = 0 \quad (\text{n-tipi}) \quad (2.1)$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} + \psi_B \right) = 0 \quad (\text{p-tipi}) \quad (2.2)$$

Burada χ yarıiletken elektron yakınlığı, E_g yasak enerji aralığı ve ψ_B ise Fermi enerji seviyesi E_F ile saf enerji seviyesi E_i arasındaki enerji farkıdır.

- d.c. beslem şartları altında yalıtkana doğru taşıyıcı geçişi yoktur yani yalıtkanın özdirenci sonsuzdur.
- Herhangi bir beslem şartı altında, yapıdaki yükler yalıtkan ile bitişik, metal yüzeyindekiler ile yarıiletkenlerdeki eşit miktarda fakat zıt yönlüdür.
- Yalıtkan bant aralığı o kadar büyüktür ki, yalıtkanın iletkenlik bandındaki yük taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilebilecek kadar küçüktür.
- Yalıtkan içinde ve yalıtkan-yarıiletken ara yüzeyinde tuzaklar, sabit ve hareketli iyonlar bulunmaz.

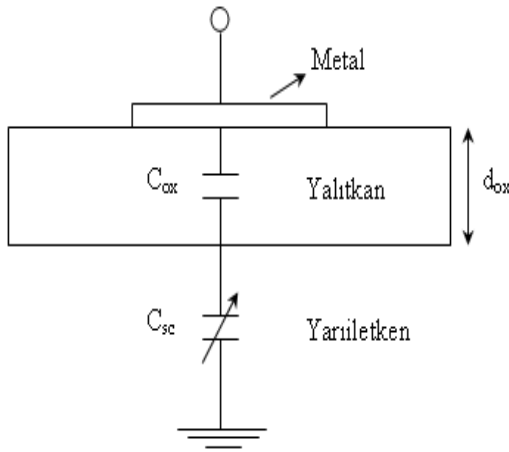
İdeal bir MIS yapıda metal elektroda gerilim uygulandığı zaman yarıiletkende yük kaymaları oluşur. Yarıiletkendeki serbest hareketli yük yoğunluğu metaldekine göre daha az ve uygulanan gerilime bağlıdır. Yarıiletken ara yüzey bölgesinde bantların bükülmesine sebep olan uzay yükü Q_{sc} oluşur. Termal denge durumunda ara yüzey 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 ya da ara yüzey bölgesindeki yığılmaları oluşturur. Uygulanan V_G geriliminin bir kısmı yarıiletken üzerine bir kısmı da yalıtkan tabaka üzerine düşer [66].

Bunun için,

$$V_G = V_{ox} + \psi_s \quad (2.3)$$

eşitliği yazılabilir. Bu ifadede V_{ox} yalıtkan üzerine düşen gerilim, ψ_s arayüzeydeki bant gerilimidir [26].

Metal ve yarıiletken tabaka arasındaki yalıtkan tabakadan dolayı metal ve yarıiletken arasında bir kapasitans oluşur. Bu kapasitans MIS kapasitansı olarak adlandırılır. Bu kondansatörlerin özelliklerini metal ve yarıiletken tabakalar arasındaki yalıtkan ve yalıtkan–yarıiletken arayüzeyi belirler. Kapasitans arayüzeyin dielektrik sabitine bağlıdır. Bir MIS kapasitansına karşılık gelen eşdeğer devre Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Uygulanan gerilimde küçük diferansiyel değişimler varsa MIS yapının kapasitansı C , yalıtkan tabakanın kapasitansı C_{ox} ve uzay yükü kapasitansı C_{sc} olarak gösterilebilir. Bunların eşdeğer kapasitansları bize MIS kapasitansını verecektir [66].



Şekil 2.3. MIS kapasitansının eşdeğer devresi

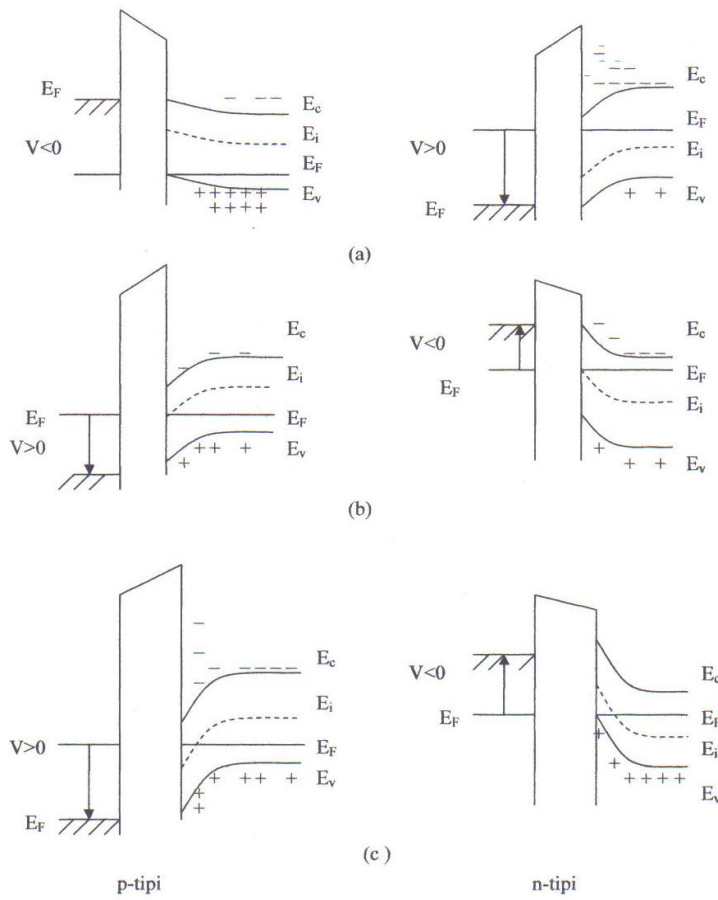
Şekil 2.3’ deki eşdeğer devrenin çözümünde MIS kapasitansı aşağıdaki eşitlikle verilir.

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

Bu sonuca göre MIS yapının eşdeğer kapasitansı, C_{sc} ve C_{ox} kapasitanslarının seri bağlanmasına eşdeğerdir. Yalıtkan tabakanın kapasitansı C_{ox} ise,

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

olarak verilir. Bağıntıda ϵ_{ox} yalıtkan tabakasının dielektrik sabiti, d_{ox} ise onun kalınlığı olup uygulanan gerilimden bağımsız olduklarından C_{ox} değeri uygulanan gerilimle değişmez. Böylece MIS yapının kapasitansındaki değişimi sadece Q_{sc} uzay yükü kapasitansı belirler. Uygulanan gerilime bağlı olarak MIS kapasitansında meydana gelen Şekil 2.4' de gösterilen durumları p-tipi bir yarıiletken için tanımlayalım [14,26].



Şekil 2.4. $V \neq 0$ durumunda ideal MIS yapının enerji-bant şeması a) Yığılım
b) Tükenim c) Tersinim

2.2.1. Yığılım

P-tipi yarıiletkenli MIS yapılarında metale negatif gerilim ($V < 0$) uygulandığında bu gerilimden dolayı oluşan elektrik alan yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan

deşikleri yarıiletken arayüzeyine doğru çeker, yarıiletkendeki değerlik (valans) elektronları bandının tepesi yukarı doğru bükülür ve Fermi seviyesine yükselir (Şekil 2.4a). İdeal bir diyotta yük akışı olmadığı zaman Fermi enerji seviyesi yarıiletkende sabit kalır. Taşıyıcı yoğunluğu üstel olarak enerji farkına ($E_F - E_V$) bağlı olduğundan, bant bükülmesi yarıiletken yüzeyinin yakınında çoğunluk taşıyıcı olandeşiklerin yığılmasına neden olur. Valans bandının yarıiletken arayüzeyinde Fermi seviyesine yaklaştığı iletim bandının da buna bağlı olarak yukarı büküldüğü bu duruma *yığılma* (*accumulation*) durumu denir. Bu durumda arayüzeyde biriken yükün yüzey yükü olması sebebiyle $C_{sc} \rightarrow \infty$, dolayısıyla $C \rightarrow C_{ox}$ olur [66].

2.2.2. Tükenim

P-tipi yarıiletkenli MIS yapılar da metale küçük bir pozitif gerilim ($V > 0$) uygulandığında yalıtkan içinde oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyindekideşikleri yüzeyden uzaklaştırır. Yarıiletken yüzeyindekideşik yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısımlarındakideşik yoğunluğundan küçük olmaya başlar ve bantlar aşağı doğru bükülür.(Şekil 2.4b) İletim bandının yarıiletken yüzeyine yakın bölgelerinde, elektronlar toplanmaya başlar. Yarıiletken yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen w genişliğinde bir bölgede,deşiklerin azaldığı bir tükenim bölgesi oluşur. Bu duruma *tükenim* (*depletion*) durumu denir. Bu olayda bantlar aşağı doğru bükülür ve çoğunluk yük taşıyıcısıdeşikler arayüzey bölgesinde tükenirler. Uygulanan gerilim arttığında ise tükenim tabakası yük dengesi için çok sayıda alıcı iyonları sağlamakla genişler. Tükenim yaygınlaştığı zaman, Silisyum gibi yarıiletken yüzey yükü tabakası, derin beslem tükenimi ve katkı yoğunluğu $0,1-10 \mu\text{m}$ civarında genişleyen iyonize olmuş katkı iyonların bölgesini içerir. Bu bölgenin genişliği aşağıdaki eşitlikle verilir[66].

$$W_D = \epsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (2.6)$$

Burada ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, A_{ox} MIS doğrultucu kontakın alanı ve C_{ox} yalıtkan oksit kapasitansıdır. Tükenim durumunda uzay yükü yoğunluğu:

$$Q_{sc} = q N_a^- W = Q_a \quad (2.7)$$

eşitliği ile verilir. Burada N_a^- iyonlaşmış alıcı yoğunluğu ve Q_a birim yüzeydeki alıcı yüküdür.

Bu bölgede MIS kapasitansını uzay yükü kapasitansı ve yalıtkan kapasitansı belirler. Yüksek frekansta gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların tekrardan birleşme hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir bu da C-V eğrisinin C_{min} 'un altına düşmesine sebep olur. Bu dengesiz bir durumdur ve *derin tükenim* olarak tanımlanır [66].

2.2.3. Tersinim

P-tipi yarıiletkenli MIS yapılarda metale büyük bir pozitif gerilim ($V \gg 0$) uygulandığı zaman bandlar oldukça aşağı doğru bükülür öyle ki saf durumdaki enerji seviyesi E_i , Fermi enerji seviyesi E_f 'nin altına düşer (Şekil 2.4c). Bu durumda yarıiletken yüzeyinde azınlık taşıyıcılar olan elektronlar artmaya başlar ve elektron yoğunluğu deşik yoğunluğundan büyük olur. Bu aşamadan sonra p-tipi yarıiletken yüzeyi n-tipi yarıiletken gibi davranır. Bu duruma *tersinim (inversion)* durumu denir [66].

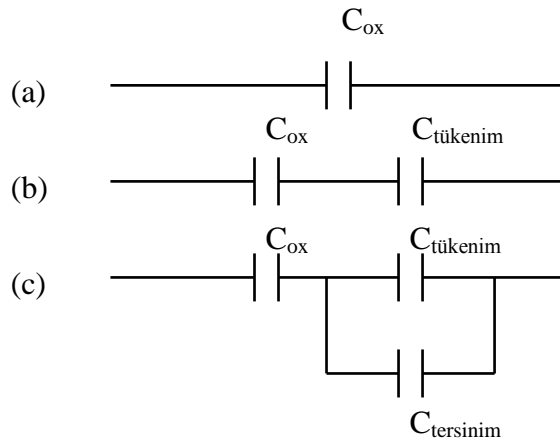
Bu durumda oluşan uzay yükü,

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

eşitliği ile verilir. Burada Q_n tersinim bölgesinde birim yüzeydeki elektronların yükü ve Q_a birim yüzeydeki alıcıların yüküdür. Bu bölgede MIS kapasitansını, elektron yoğunluğunun, uygulanan gerilimin a.c. sinyalini takip edebilme yeteneği belirler. Elektron yoğunluğu a.c. sinyalini küçük frekanslarda takip edebilir ve kapasitans artan gerilimle yalıtkan kapasitansının değerine ulaşır. Ara frekanslarda daha yavaş takip edebilir, dolayısıyla frekansın değerine bağlı olarak ara frekans eğrileri görülür,

yüksek frekanslarda ise takip edemez. Sabit yük uzay yükü gibi etki eder ve kapasitans C_{min} 'de kalır. Yüksek frekansta eğer gerilim ani olarak değiştirilirse, azınlık taşıyıcıların yeniden birleşme (rekombinasyon) hızına bağlı olarak tersinim yükü daha geç birikir. Bu da eğrinin C_{min} 'in altında değerler almasına neden olur[66].

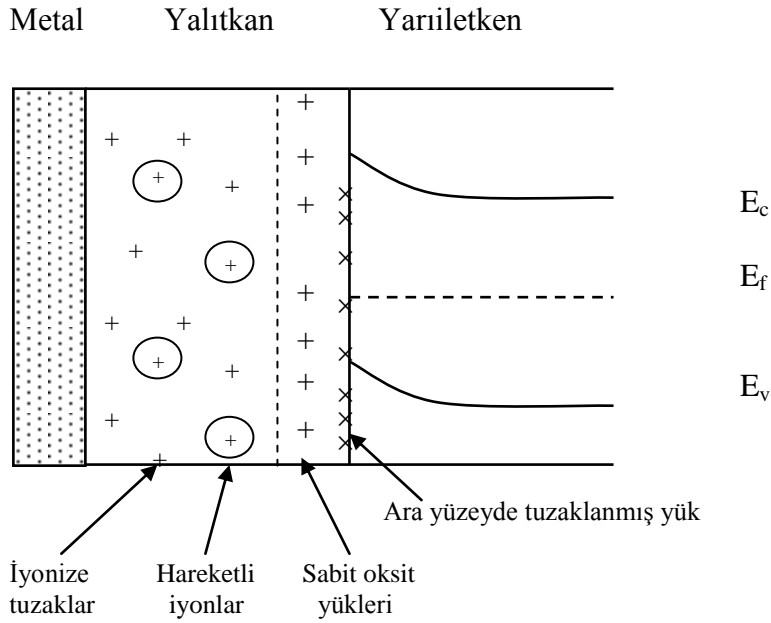
İdeal bir MIS yapıda yığılım, tükenim ve tersinim durumları için devre şeması Şekil 2.5'deki gibidir [14].



Şekil 2.5. İdeal bir MIS yapının devre şeması a) Yığılım b) Tükenim c) Tersinim

2.3. Gerçek MIS Yapısı

İdeal bir yalıtıkanda, kendi içerisinde ve yarıiletken ile birleşim yüzeyi arasında hiçbir hareketli yük yoktur. Gerçek yapılarda yalıtkan ve yarıiletken arayüzeyi hiçbir zaman elektriksel olarak nötr değildir. Doymamış bağlardan veya safsızlıklardan kaynaklanan yalıtkan-yarıiletken arayüzeyindeki arayüzey durumları olarak adlandırılan tuzaklanmış yükler ve oksidasyon sırasında yonteme bağlı olarak birçok durum ortaya çıkar ve bu durumlar MIS yapısının ideal özelliklerinden sapmasına neden olur [28]. Bu durumların sınıflandırılması Şekil 2.6'da gösterilmiştir [14].



Şekil 2.6. İdeal olmayan MIS yapısında arayüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması

Bunları sırayla;

- Numunenin x-ışını radyasyonuna maruz kalmasıyla oluşabilen iyonize tuzaklar,
- Yarıiletken yüzeyinde veya yakınında yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alan altında hareketsiz olan sabit yüzey yükleri,
- Yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içinde enerji seviyeleri gibi tanımlanan arayüzey durumları,
- Yalıtkan içindeki hareketli iyonlar.

2.3.1. İyonlaşmış tuzaklar

Kimyasal yapı bozukluklarından ve radyasyondan kaynaklanan bu tuzaklar yalıtkan içinde bulunurlar. Yarıiletken arayüzeyi ile yük alışverişi yaparlar. Bu şekilde yalıtkan oksit ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde ilave bir yük oluştururlar. İyonlaşmış tuzaklar elektron yakalayarak yüksüz hale geçerler. Bu tuzaklar kapasitans-voltaj eğrisine etki ederler. Gerilimi negatif değerlerden pozitif değerlere

doğru artırırken ölçülen kapasitans değerleri ile gerilimi pozitif değerlerden negatif değerlere doğru artırırken ölçülen kapasitans değerleri arasında farklılıklardan dolayı kapasitans-voltaj eğrisinde *hysteresis* etkisi gözlenir. Kapasitans-gerilim eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı oksit içindeki tuzakların miktarını verir. Dolayısıyla hysteresis yük yoğunluğu[66]:

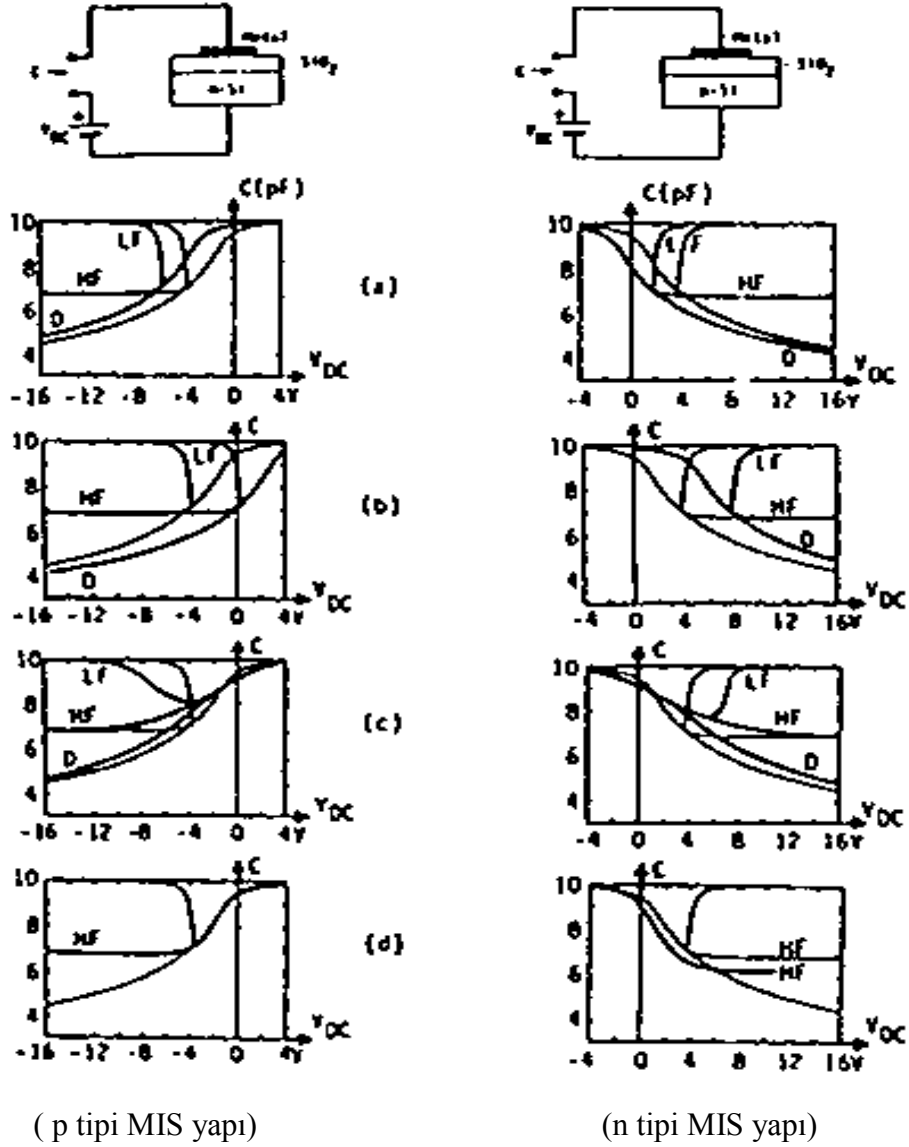
$$\Delta Q_{His} = \frac{\Delta V_{HisFB} C_{ox}}{q} \quad (2.9)$$

şeklinde yazılır. Burada ΔV_{HisFB} düz banttaki kayma miktarıdır.

2.3.2. Sabit oksit ve arayüzey yükleri

Sabit oksit ve arayüzey yükleri yalıtkan içinde ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde bulunurlar. Yalıtkanla yarıiletkenin kristal yapılarının farklı olmasından dolayı oksidasyon esnasında yarıiletkenden yalıtkan tabakasına geçerken kaçınılmaz olan kristal bozuklukları yerel yüklere neden olurlar. Arayüzeyde pozitif veya negatif sabit oksit yükleri mevcut olduğu zaman yüksek frekans C-V eğrilerinin gerilim eksenini boyunca değişimi Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin her ikisi için, ideal C-V eğrisine göre, uygulama geriliminin negatif değerlerine doğru C-V eğrisinin kaymasına pozitif sabit oksit yükleri (+ Q_f), C-V eğrisinin ileri pozitif uygulama gerilimine doğru kaymasına da negatif sabit oksit yükleri(- Q_f) sebep olurlar [15]. Bu yüklerin başlıca özelliği, yalıtkan-yarıiletken yapısına uygulanan gerilimden yük durumlarının bağımsız olmasıdır. Yarıiletken ile bu yük merkezleri arasında yük alışverişı olmaz. Yalıtkan oksidin büyüme koşulları yük yoğunluğuna etki eder (yalıtkan oksidin büyüme hızı, oksitleyen gaz, sıcaklık gibi) [29].



Şekil 2.7. p tipi ve n tipi MIS yapı için pozitif veya negatif sabit oksit yüklerine göre voltaj eksenini boyunca C-V eğrilerinin değişimi.

MIS kapasitansı eğrisinde sabit yükün etkisi, gerilim eksenini boyunca C-V eğrisinin paralel kaymasıdır ve ΔV kayma miktarı,

$$\Delta V = \frac{Q_{fc}}{C_{ox}} = \frac{\Delta Q_{ox}}{C_{ox}} q \quad (2.10)$$

şeklinde yazılır. Sabit oksit yüklerinin sebep olduğu kaymadan faydalanılarak yalıtkan içindeki sabit pozitif yük yoğunluğu ΔQ_{ox} , yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde oluşan toplam yük ΔQ_{eff} ve arayüzey yük yoğunluğu ΔQ_{ss} hesaplanır. Buna göre ΔQ_{ox} , ΔQ_{eff} ve ΔQ_{ss} ;

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

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

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

bağıntılarıyla verilir. Burada, ΔV_{MG} gerçek ve ideal C-V eğrilerinin bant ortasındaki gerilim kaymasını ve ΔV_{FB} düz bant durumunda gerilim kaymasını göstermektedir. Düz bant gerilim kaymasına, yalıtkan içine enjekte olmuş yükler yada yalıtkan içindeki hareketli yükler neden olabilir [17].

2.3.3. Arayüzey durumları

Arayüzey durumlarının tanımı Shockley, Taam ve diğer bilim adamları tarafından teoriksel olarak araştırılmıştır. Buna göre arayüzey durumları, kısa bir zamanda yarıiletkenle yükleri değişebilen yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığı içindeki girilebilir enerji seviyeleridir. Arayüzey durumları verici veya alıcı tipte olabilirler. Alıcı, enerji seviyesi dolu ise negatif yüklü, boş ise yüksüzdür. Verici, enerji seviyesi dolu ise yüksüz, boş ise pozitif yüklüdür. Bir gerilim uygulandığında, arayüzey tuzak seviyeleri, Fermi seviyesi geride sabit kalırken valans ve iletkenlik bantları ile aşağı ve yukarı hareket ederler. Arayüzey tuzaklarındaki yükün değişimi, arayüzey tuzakları iletkenlik bandı ve valans bandı ile yük alışverişi yapmasıyla meydana gelir. Bu yükün değişimi MIS kapasitansına katkıda bulunur ve ideal MIS eğrisini değiştirir.

Arayüzey durumlarının elektriksel etkileri şu niceliklere ayrılabilir:

Kapasite; bir arayüzey duruma, arayüzeyde izin verilen başka bir durumun eklenmesiyle meydana gelir. Bu yüzden durum başına temel yükün bir kapasitesi eklenir. Bu kapasite uygulanan gerilimin keskin bir pikidir. Fermi seviyesi arayüzey durum seviyesini aştığı için pik gerilim için görülür.

İletim; arayüzey durumları tarafından taşıyıcıların yayınlanması ve yakalanması sonsuz hızda olmadığından zaman gecikmesi ile birleştirilir. Bu zaman gecikmesi arayüzey durumunun bir RC devresiyle özdeşleştirilmesiyle ifade edilir. Bu zaman kayması aynı zamanda dolmuş boşalım zamanıdır ve $\tau=1/(R_{ss}C_{ss})$ bağıntısı ile verilir ve R_{ss} arayüzey direncidir [29].

Devredeki arayüzey kapasitansı C_{ss} aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$C_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_{ss}} A_{ox} \quad (2.14)$$

Arayüzey potansiyeli; yukarıda ifade ettiğimiz kapasite ve iletim a.c. etkisindedir. Arayüzey durumları bunlara ek olarak bir d.c. etkisine de sebep olur. Arayüzey durumlarında depo edilmiş yük, arayüzey elektrik alanını değiştirir. Arayüzey durumları mevcut iken arayüzey potansiyelini değiştirmek için ideal durumdan daha fazla gerilim uygulanması gerekmektedir. Bu etki kapasite-gerilimin zorunlu genişlemesi (stretch out) olarak gözüktür.

Arayüzey durumları C-V eğrisinin ideal C-V eğrisine göre kaymasına sebep olur. Arayüzey durumlarının birim enerji ve birim alan başına durum yoğunluğu;

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} \quad (2.15)$$

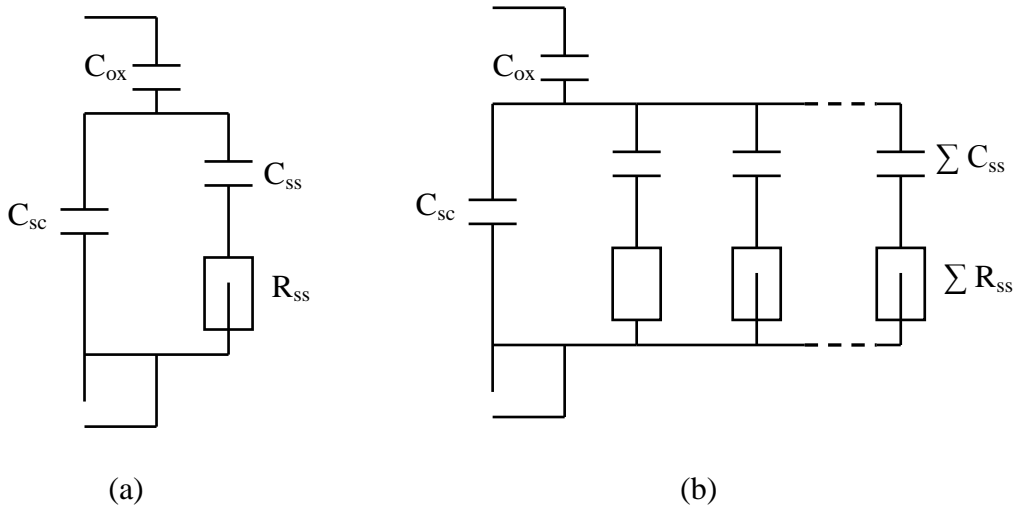
ile verilir. Yani, birim enerji başına birim arayüzey durum yükü olarak tanımlanır. Burada E enerji olup $E=q\psi_s$ ile verilir. E' nin diferansiyeli alınırsa $dE = qd\psi_s$ elde edilir. Bunu Eş. 2.31'de yerine koyup tekrar düzenlersek durum yoğunluğu:

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_s} \frac{\partial \Psi_s}{\partial E} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \Psi_s} \quad (2.16)$$

şeklinde yazılır. Arayüzey durumlarında bulunan Q_{ss} yük yoğunluğu yarıiletkendeki katkı yoğunluğu ve oksit kalınlıklarından etkilenmez [30].

Bir elektron veya deşik tarafından bir arayüzey durumunun işgal edilme olasılığı, bu yüzey durumunun safsızlık enerji seviyelerindeki gibi fermi seviyesiyle belirlenir. Bu şekilde yüzey potansiyeli değişikçe arayüzey durumun enerji seviyesi de onunla hareket eder. Sonuçta fermi seviyesinin bu bağıl değişikliği bir elektron tarafından bu arayüzey durumunun işgal edilme olasılığının değişimine sebep olur.

Arayüzey durumları, uzay yükü kapasitansına paralel kapasitans ve seri direnç etkisi yaptığıında temel eşdeğer devre Şekil 2.8'de verildiği gibidir.



Şekil 2.8. MIS yapısının eşdeğer devresi. a) Bir enerji seviyesi için
b) Birbirinden farklı enerji seviyeleri için

2.3.4. Hareketli iyonlar

Hareketli yükler, ya metal-yalıtkan arayüzeyinde ya da yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde bulunurlar. Hareketli iyonlar genellikle Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ iyonlarıdır [31]. Böyle iyonlar nispeten düşük sıcaklıklarda oksit içinde hareketli olduklarından sürüklenme olabilir. Hareketsiz oksit yükü, beslem sıcaklığı ile hareketli iyonik yükten ayırt edilebilir. Hareketli iyonlar, kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları içinde bulundurması, mekanik parlatma esnasında çıplak elle temaslar, oksitleme fırını, kuartz tutucuların kirli olması ve oksitleme gazlarında bulunan safsızlıklar yüzünden oksit içinde yer alabilirler. Bu yükler uygulanan elektrik alanda altında hareket ettiklerinden MIS yapısının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar [66].

2.4. MIS Diyotlarda Arayüzey Durum Yoğunluğu Teorisi

Bir MIS yapıda arayüzey tuzaklar ve oksit yüklerinin varlığı ideal MIS karakteristiklerini etkileyecektir. Bir yarıiletkenin kristal yapısında bulunan yabancı bir atom veya bir bozunma, yasak enerji bölgesinde enerji seviyelerinin ortaya çıkmasına yol açabilir. Bir MIS yapılışı sırasında silisyum yüzeyi ne kadar temizlense de giderilemeyen yarıiletken örgünün son bulduğu kristal yüzeyindeki düzensizlikler sonucunda da yasak enerji bölgesinde birim alan başına çok sayıda enerji seviyesi meydana gelir. Bu seviyelere yüzey durumları adı verilir [14].

Yüzey durumları yoğunluğu için kuramsal tahminler yüzey atomlarının yoğunluğu mertebesinde, yani 10^{15} cm^{-2} civarında fakat deneysel sonuçlar bunun sadece 10^{11} - 10^{14} cm^{-2} mertebesinde olduğunu göstermektedir [14]. Yüzey durumları yavaş ve hızlı olmak üzere ikiye ayrılır. Yavaş yüzey durumları yalıtkanın metal tarafındaki yüzeyinde bulunur. Bunlar yalıtkan yapısındaki hareketsiz yükler ihtiva eden bozukluklar ile yeterli sıcaklıklarda ve özellikle yüksek elektrik alan altında yalıtkan içerisinde göç etmeye yatkın, hareketli iyonlar tarafından meydana getirilir. Yavaş yüzey durumları termal oksidasyon ile hemen hemen giderilebilir. Yavaş yüzey durumları MIS kapasitesini etkilemez [66].

Hızlı yüzey durumları yalıtkanla yarıiletken arayüzeyi yakınında yer alır ve yasak enerji bölgesinin ortasına yakın enerjilere sahiptir. Dolayısıyla bant bükülmesi ile yani yüzey potansiyelinin değişmesi ile yüzey durumları da bükülmeyen Fermi seviyesine göre aşağı yukarı hareket edeceğinden iletkenlik veya valans bandı ile ani yük alışverişi yapar. Arayüzeyde bulunan ve yasak enerji bölgesi dışındaki enerjilere sahip yüzey durumlarına sabit yüzey durumları ve taşıdıkları yüke de sabit yüzey yükü veya oksit yükü denir [66].

Tuzaklanmış arayüzey yükleri, yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde, yarıiletkenin yasak enerji bant aralığındaki enerji durumlarına sahip ve kısa bir sürede silisyumdaki iletkenlik veya valans bandı ile ani yük alış verişi yapabildiklerinden dolayı bu yüzey durumlarına yüzey rekombinasyon (yeniden birleştirme) merkezleri de denir. Temiz yüzeylerde ve yüksek vakum altındaki ölçümler, yüzey atomlarının yoğunluğunun mertebesini çok yüksek yapar. Arayüzey tuzaklar için dağılım fonksiyonu; verici arayüzey tuzaklar için,

$$f_{SD}(E_t) = \frac{1}{1 + g \exp\left(\frac{E_F - E_t}{kT}\right)} \quad (2.17)$$

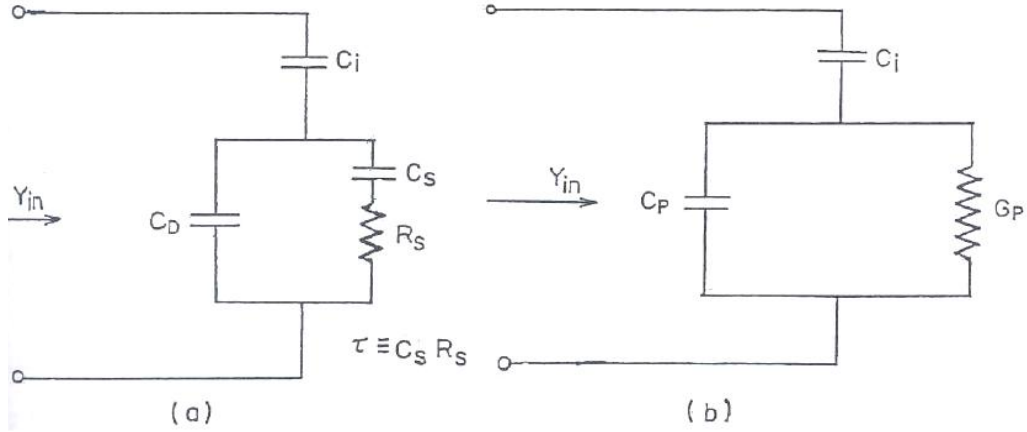
ve alıcı arayüzey tuzaklar için ise,

$$f_{SA}(E_t) = \frac{1}{1 + \frac{1}{g} \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right)} \quad (2.18)$$

şeklindedir. Burada E_t , arayüzey tuzak seviyesi enerjisi, E_F Fermi enerji seviyesi ve g ise termal durum dejenerasyonu olup değeri verici tuzakları için 2, alıcı tuzaklar için 4'dür [32].

Bir beslem altında arayüzey tuzak seviyeleri valans veya iletkenlik bantları ile Fermi seviyesi sabitleşene kadar yukarı veya aşağı hareket eder. Bu değişme MIS

kapasitesinde ve ideal eğrisinde değişmeye sebep olur. Arayüzey tuzaklarının etkisini kapsayan eşdeğer devre Şekil 2.9'da gösterilmiştir[66].



Şekil 2.9. Arayüzey tuzaklarının etkisini içeren eşdeğer devre

Burada C_i ve C_D sırası ile yalıtkan kapasitans ve yarıiletken tüketim tabaka kapasitansdır. $C_S R_S$ çarpanı arayüzey tuzaklarının ömrü (τ) olarak tanımlanmış ve bu arayüzey tuzaklarının davranışını belirler. Şekil 2.9.(a)'nın paralel kolu, Şekil 2.9.(b)'deki gibi frekans bağımlı kapasitans C_P ve ona paralel bağlı frekans bağımlı iletkenlik G_P şeklinde yazılabildiği gösterilebilir. Paralel koldaki admittans,

$$Y = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = j\omega C_D + \frac{1}{R_S + \frac{1}{j\omega C_S}} = G_P + j\omega C_P \quad (2.19)$$

şeklindedir. Burada iletkenlik G_P ve kapasitans C_P ,

$$G_P = \frac{1}{R_P} = \frac{C_S \omega^2 \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.20a)$$

$$C_P = C_D + \frac{C_S}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.21b)$$

eşitlikleri ile verilir. Toplam empedans Z ise,

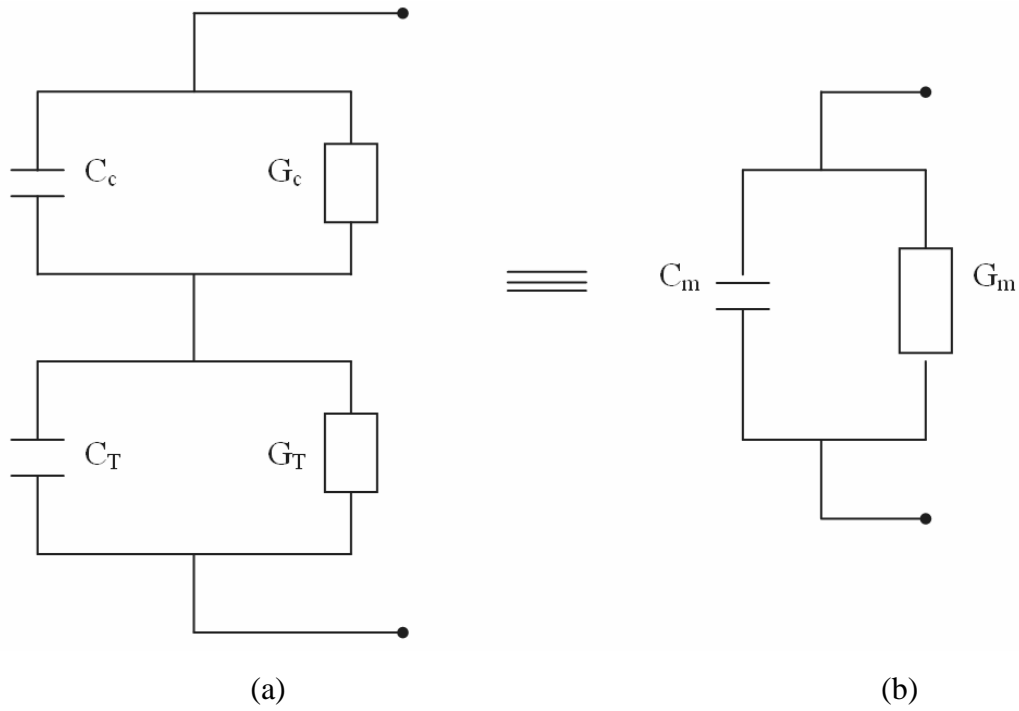
$$Z = \frac{1}{j\omega C_i} + \frac{1}{G_p + j\omega C_p} = -j\left(\frac{1}{\omega C_i} + \frac{\omega C_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}\right) + \frac{G_p}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2} \quad (2.22)$$

ve buradan toplam admittans Y_{top} için,

$$Y_{top} = \left(\frac{G_p^2 + \omega^2 C_p^2}{G_p}\right) + j\omega\left(\frac{(G_p^2 + \omega^2 C_p^2)C_i}{G_p^2 + \omega^2 C_p^2 + \omega C_p}\right) = G_{in} + j\omega C_{in} \quad (2.23)$$

eşitliği elde edilir [14,33].

Eğer seri direnç varsa ve büyükse, ölçülen iletkenlik G_m ve kapasitans C_m gerçek değerler değildir [34]. Bu durumun eşdeğer devresi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. MIS yapının eşdeğer devresi

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_c + G_c} \quad Z_2 = \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \quad Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} \quad (2.24)$$

Şimdi C_c ve G_c analitik çözümünü yapılabilir.

$Z = Z_1 + Z_2$ 'den $Z_1 = Z - Z_2$ 'dir. Buna göre,

$$\frac{1}{Z_1} = j\omega C_c + G_c = \left(\frac{1}{j\omega C_m + G_m} - \frac{1}{j\omega C_T + G_T} \right)^{-1}$$

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{(G_m G_T - \omega^2 C_m C_T) + j\omega(G_T C_m - C_T G_m)}{(G_T - G_m) + j(C_T - C_m)} \quad (2.25)$$

denkleminin paydası eşleniği ile çarpılır. $G_T = 1/R_s$ yazılır ve C_T değeri ihmal edilirse düzeltilmiş iletkenlik için,

$$G_c = \frac{(G_m - G_m^2 R_s) - \omega^2 C_m^2 R_s}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.26)$$

elde edilir. Burada seri direnç R_s , Şekil. 2.10.(b)' deki devrenin empedansı Z' nin reel kısmı olup yüksek frekansta ve kuvvetli yığılımdaki C_m ve G_m değerlerinden hesaplanabilir [15].

$$Z = \frac{1}{j\omega C_m + G_m} = \frac{G_m - j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} - \frac{j\omega C_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.27)$$

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.28)$$

elde edilir. Eş. 2.25'in düzenlenmiş şeklinin imajiner kısmı yani düzeltilmiş kapasitans aşağıdaki gibidir.

$$C_c = \frac{C_m}{(1 - G_m R_s)^2 + \omega^2 C_m^2 R_s^2} \quad (2.29)$$

Eş. 2.26 ve Eş. 2.29 denklemlerini yeniden düzenlersek [15],

$$C_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) C_m}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.30a)$$

$$G_c = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2) a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (2.30b)$$

elde edilir. Burada,

$$a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2) R_s \quad (2.31)$$

olup C_m ve G_m ölçülen kapasitans ve iletkenliktir. $R_s=0$ durumunda $C_c = C_m$ ve $G_c = G_m$ olur.

2.5. Ferroelektrik Malzemeler ve Özellikleri

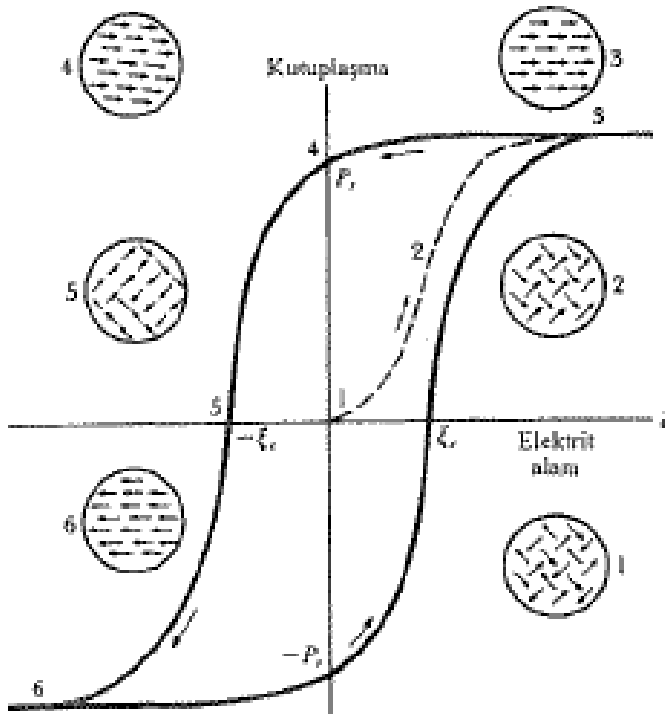
Ferroelektrik özellikler gösteren materyaller, kristalografik olarak payroelektrik grubundandır. Payroelektrik özellik çok eski tarihlerden beri bilinmekteydi. Bir materyalin kendiliğinden elektrik dipol momenti sergilemesi olarak bilinen payroelektrik etkinin eski zamanlardan beri bilinmesi, bu etkinin gözlenebildiği maddenin ısıtıldığında bazı nesnelere çekmesinden kaynaklanıyordu.

Payroelektrik etkiyi fiziksel bir tabana oturtmak için 18. ve 19. yüzyıllarda oldukça çok deney yapıldı. Bu yoğun araştırmalar sonucunda 1880'de J. Curie ve P. Curie tarafından yeni bir etki keşfedildi (Lines and Glass, 1977): piezoelektrik etki. Bu etkiyi sergileyen malzemelerde stres altında elektriksel kutuplanma (piezoelektrik etki) veya elektrik alanında deformasyon (ters piezoelektrik etki) gözlenmekteydi.

Ferroelektrikliğin Valasek (1920) tarafından keşfedilmesinden beri ferroelektriklik ve bu özelliği taşıyan malzemeler, fizikçilerin yoğun ilgi gösterdikleri alanlardan biri olmuştur. Ferroelektrikler ve lineer olmayan kristaller günümüzde katıhal fiziğinin önemli bir alanı olmuştur. Ferroelektrik malzemelerin bilhassa lineer olmayan özellikleri araştırmacılar tarafından oldukça ilgi görmüş ve birçok uygulama alanı bulmuştur. Keşfedilen ilk ferroelektrik yarıiletken $BaTiO_3$ olmuş ve daha sonra $A^V B^{VI} C^{VII}$ tip yarıiletkenlerin de (SbSI gibi) ferroelektrik özellikler taşıdığı tespit edilmiştir. Bu üçlü bileşikler aynı zamanda yüksek duyarlıklı foto-iletkenlerdir.

Malzemelere elektrik alan uygulandığında dipoller alan doğrultusunda yönelir ve alan kaldırıldığında malzeme kalıcı dipol içeriyor olsa dahi polarizasyon genellikle kalkar. Ancak ferroelektrik malzemede elektrik alan kaldırıldığında malzemede bir miktar polarizasyon kalır. Ayrıca elektriksel alan ile polarizasyon yönü değiştirilebilmektedir.

Bazı malzemelerde yerel kutuplar rastgele dağınıktır ve malzeme net bir kutba sahip değildir. Bu dağınık kutuplar alan etkisinde yönlendirilerek malzemeye net bir kutup kazandırılır. Kutuplaşmanın etkinliği malzeme yüzeyinde sağladığı elektriksel yük yoğunluğu ölçerek saptanır. Alan uygulanınca kutuplar dönerek alan doğrultusunda yönelmeye zorlanır.



Şekil 2.11. Ferroelektrik histerezis döngüsü

Net bir kutuplaşması olmayan kutup çiftleri rastgele yönelmiş bir kristali ele alacak olursak; bir alan uygulandığında kutup çiftleri şekilde 1. Bölgeden 3. Bölgeye alanın etkisiyle hizalanır. Sonunda alan kutup çiftlerinin hepsini hizalar veya doyuma ulaştırır. Kutuplaşma 3.bölgede oluşur. Ardından alan kaldırıldığında kalıcı kutup, Kutuplar arasında ki bağlanmadan ötürü 4. Bölgede malzeme kalıcı olarak kutuplaşır. Zıt yönde bir alan uygulandığında kutup çiftleri ters dönmek zorundadır. Zorlayıcı bir alan, kutuplaşmayı uzaklaştırmak ve kutup çiftlerini 5. Bölgede rastgele yapmak için uygulanır. Ters alan daha da artırılırsa zıt kutuplaşma 6. Bölgede doyuma ulaşır. Alan değişmeye devam ettiğinde, histerezis döngüsü ferroelektrik kutuplaşmanın alanla nasıl değiştiğini gösterir.

Elektriksel yükün değişken alanla böyle bir kapalı eğri şeklinde değişimi kutuplaşmanın tersinir olduğunu gösterir. Bu özelliğe ferroelektrik özellik buna sahip malzemelere de ferroelektrik malzemeler denir.

Ferroelektrik malzemeler genellikle yüksek dielektrik sabitine sahiptir ve dielektriksel özellikleri sıcaklık ve elektrik alana bağlıdır. Ferroelektrik malzemeler, ısı etkisiyle kutuplanabilen piroelektrik malzemelerin bir alt sınıfı olup, dış bir elektrik alan uygulandığında, merkezindeki atomun yönelimine bağlı anlık kutuplanma göstermektedir. Ferroelektrik malzemeler piezoelektrik özellikler gibi pyroelektrik özellikler de göstermektedir [35,36].

Birçok yıldır cihazlarda çeşitlilikle kullanılmalarına rağmen ferroelektrik malzemeler, malzemelerin piroelektrik veya piezoelektrik gibi diğer özellikleri olmuş ve kullanılmışlardır. Bu durum son birkaç yılda değişmiştir. Ferroelektrik malzemelerin rastgele giriş hafızalarında kullanılmaları ve birçok uygulamada manyetik kor hafızaları ve manyetik balon hafızalarının yerini alması beklenmektedir. Bunun yanında, ferroelektrik malzemeler yüksek dielektrik sabitinden dolayı elektronik endüstrisi için kapasitör üretiminde kullanılabilir ve ürünlerin daha çok fonksiyonlu olması ve boyutlarının minyatürize edilmesi açısından da yeni bir bakışa sahiptirler. Dahası ferroelektrik malzemeler, potansiyel uygulamalara sahip uydular, yeryüzünde iletişim ve diğer mikrodalga uygulamaları gibi alanlarda kullanılan, çalışma frekansları Si tabanlı cihazlarınkinden daha yüksek bir aralıkta olan tünellenebilir mikrodalga cihazlarının geliştirilmesinde kullanılabilir.

Ferroelektrik ince filmler kullanılarak elektriksel olarak tünellenebilir mikrodalga karmaşık devreleri geliştirilebilir. Bu yüzden ferroelektrik ince filmlerin dielektrik sabiti ve tünelleme etkisini karakterize etmek çok önemlidir. Ferroelektrik malzemelerin kompozit, polikristal seramik, tek kristal tozu ve ince film halinde olmalarına göre, farklı karakterizasyon yöntemleri uygulanmalıdır. Genellikle kompozitler, seramikler ve ferroelektrik kristal tozunun dielektrik özellikleri karakterize edilirken nonrezonant ve rezonant metotlar kullanılır [37]. Çoğunlukla bu tip malzemelerin dielektrik relaksasyonlarına ilgi duyulur ve ferroelektrik ince filmler genellikle planar devre metotları kullanılarak karakterize edilir ve hemen hemen dielektrik relaksasyon ve elektriksel tünellemenin dahil olduğu tüm dielektriksel özelliklerinin belirlenmesi istenir.

Ferroelektrik malzemelerin karakterizasyonunda dikkate alınması gereken özelliklerden birincisi, bu malzemelerin dielektrik sabitlerinin oldukça yüksek olmasıdır. İkincisi, dc elektrik alanının uygulanma şekilleridir. Üçüncüsü ise, ölçüm sıcaklığının nasıl kontrol edileceğidir.

Ferroelektrik hafıza ile ilgili ilk deneyler, Moll ve Tarui tarafından 1963 yılında Stanford üniversitesinde gerçekleştirilmiştir [37,38]. Uygulamalar için bu hafıza elemanından beklenen, adapte edileceği sistem içerisinde, değişken artış bileşeni olarak yer alması olmuştur. Bu aygıt için temel düşünce bir ferroelektrik malzeme içerisinde hafıza fonksiyonunun olması ve ferroelektrik malzemede artık kutuplanma ile bir yarıiletkenin alan etkili iletimini kontrol edebilmesidir. O dönemde, ferroelektrik ince filmlerden daha çok, yarıiletkenlerle ilgili deneyimler mevcut olduğundan, tek kristal ferroelektrik malzemenin, yarıiletkenle kombinasyonu tercih edilmiştir [38].

Son yıllarda ferroelektrik hafıza aygıtları, yeni nesil karmaşık devrelerde, çeşitli uygulamalarda kullanılabilirliği açısından, oldukça ilgi çekici olmuştur. Ferroelektrik ince filmlerin, metal elektrotlar içerisine sandviç yapı haline getirilmesi konusunda, oldukça kapsamlı çalışmalar yapılmış ve FeRAM'lar olarak ortaya çıkmıştır. Bu filmler ferroelektrik rastgele girişli hafızalarda (FeRAMs), hafıza elemanı olarak geliştirilmiştir. FeRAM'ar kararlı hafızalar olup, bir güç kaynağı kullanmadan, bilgiyi saklayabilme özelliğine sahiptir [39]. FeRAM'arı daha iyi anlamak için, bir metal-ferroelektrik-metal (MFM) tipli kapasitör geliştirilmiştir [40].

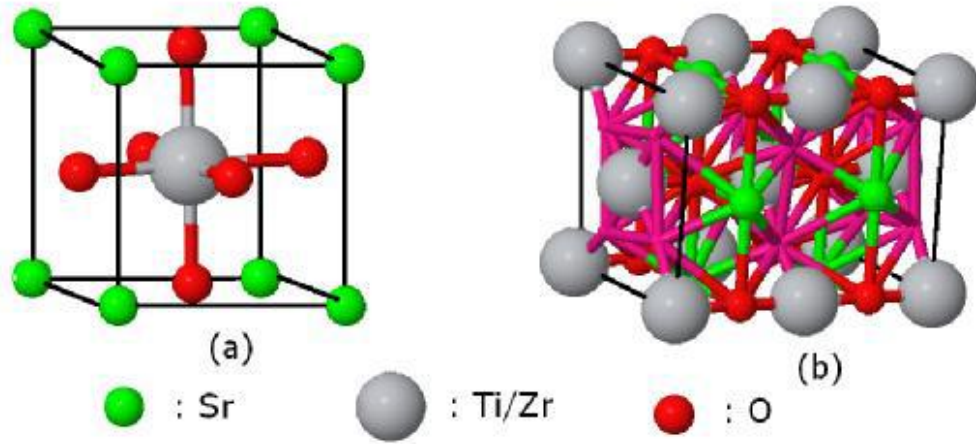
Diğer bir ferroelektrik hafıza elemanı, ferroelektrik alan etkili transistörler (FeFET)'dir. (FeFET) ve alan etkili transistörlerde, metal-ferroelektrik-yarıiletken yapı oluşturmak için, ferroelektrik ince filmleri kullanılır. Böyle bir yapıda yarıiletkenin yüzey potansiyeli, ferroelektrik ince filmlerdeki kutuplanma ile kontrol edilir [66].

2.6. SrTiO₃ Kristal Yapısı

Herhangi bir kristal sahip olduğu simetri elemanlarına göre bilinen 32 kristal sınıfından (veya 32 nokta grubundan) birine aittir. Bu 32 kristal sınıfından 11'i bir simetri merkezine sahiptirler ve "simetri merkezli (centrosymmetric)" kristal olarak adlandırılırlar. Simetri merkezine sahip bir kristal polar özellikler gösteremez. Örneğin simetri merkezine sahip bir kristale düzgün bir stres uyguladığımızda kristal içinde gerçekten yük yer değiştirmeleri olacaktır. Fakat simetri merkezinin varlığı görece yer değiştirmelerin birbirlerini telafi etmelerine neden olacaktır. Eğer yine böyle bir kristale bir elektrik alan uygularsak kristalin şeklinde küçük değişimler olacaktır fakat uygulanan alanın yönünü tersine çevirsek de deformasyon (strain) değişmez kalacaktır. Yani deformasyon uygulanan alanın karesi ile orantılı olacaktır. Bu etki "electrstriction effect" olarak adlandırılır. Bu etki piezoelektrik etkiden (lineer bir etkidir) farklıdır ve tüm maddelerde gerçekleşir.

Perovskitler, ABO₃ genel formunda olup ferroelektrik materyallerin önemli bir sınıfını oluştururlar. Perovskit yapı, 1945 de BaTiO₃ kristalinin bulunmasından beri teorik ve deneysel ilgiyi üzerlerine çekmişlerdir. ABO₃ tipi perovskitler sıcaklığın bir fonksiyonu olarak yer değiştiren zengin faz diyagramlarından dolayı yoğun olarak çalışılan ferroelektrik materyallerin bir grubudur [72].

Perovskitler, yüksek sıcaklıkta paraelektrik basit kübik yapıda bulunurlar ve sıcaklık düşürüldüğünde çeşitli ferroelektrik yapılara dönüşebilirler. SrTiO₃ kristallerinin yapıları ABO₃ perovskit tipindedir. SrTiO₃ perovskite kristal yapısında tipik bir geçiş metal oksittir. Geçiş metal oksitler, teknolojik ve fiziksel özelliğinden dolayı yoğun bir şekilde üzerlerinde deneysel ve teorik çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle d-bantlı geçiş metal oksitler, fotokatot (photocatalyst) özelliklerinden dolayı ilginçtirler. SrTiO₃, oda sıcaklığında kübik yapıda olup büyük dielektrik sabitli bir yalıtkandır. Kübik yapıda Sr iyonları küpün köşelerinde, O iyonları küpün yüzey merkezlerinde ve Ti iyonu da cisim merkezindedir. SrTiO₃ Kristali oda sıcaklığında paraelektrik fazda bulunur. Sıcaklığın azalmasıyla yapıdaki simetri bozularak 105 K tetragonal faza geçer [72].



Şekil 2.12. Sr(Ti/Zr)O₃ kristalinin (a) kübik ve (b) tetragonal fazdaki yapısı.

2.7. Metal-Ferroelektrik-Yarıiletken (MFS) Yapı

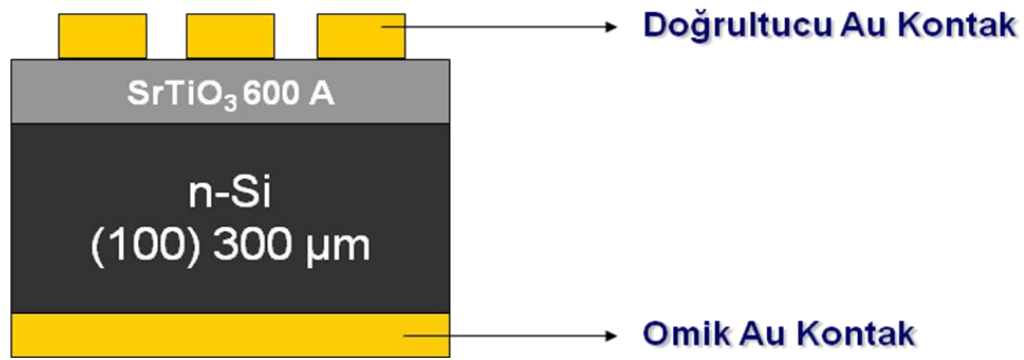
Son yıllarda, ferroelektrik hafıza elemanlarına artan bir ilgi gösterilmektedir. Bunun sebebi yeni jenerasyon karmaşık devrelerde uygulanabilirliğidir. Bu devre elemanları potansiyel avantajlara sahiptir:

- kalıcılık
- limitsiz yazma çevirimi
- düşük güç tüketimi

Metal-ferroelektrik-yarıiletken (MFS) yapılar hasarsız okuma ve yüksek yoğunluklu hafıza cihazları olarak, teknolojik çalışmalara konu olmuştur [28,41]. Literatürde kabul görmüş MFS yapılar için; Si ve ferroelektrik film arayüzlerinde, Si tabanlı bileşiklerin oluşması, yüksek yoğunluklu tuzak yüklerin varlığı, Si yarıiletkeni içerisine, elementlerin difüzyonu gibi, birçok problemle karşılaşmaktadır [42]. Bununla birlikte, iyi arayüze sahip ferroelektrik/Si yapıyı hazırlamak, Si ve ferroelektrik malzemenin birbiri içerisine yayılması ve kimyasal reaksiyonlardan dolayı oldukça zordur. Genellikle metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFS) yapı tercih edilir. Bu problemleri çözmek amacıyla, ferroelektrik film ve Si

arasındaki, yalıtkan bir ince film tabakası sonucu oluşacak, metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFS) yapıların incelenmesi önerisi ortaya çıkmıştır.

Bir MFS yapının şematik gösterimi Şekil 2.13'de verilmektedir. Bu yapılar, levhalardan birisinin metal, diğerinin yarıiletken olmasından dolayı paralel plakalı bir kondansatöre benzer. Bu yapının belirgin özellikleri paralel levhalı kondansatörde olduğu gibi yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir [43].

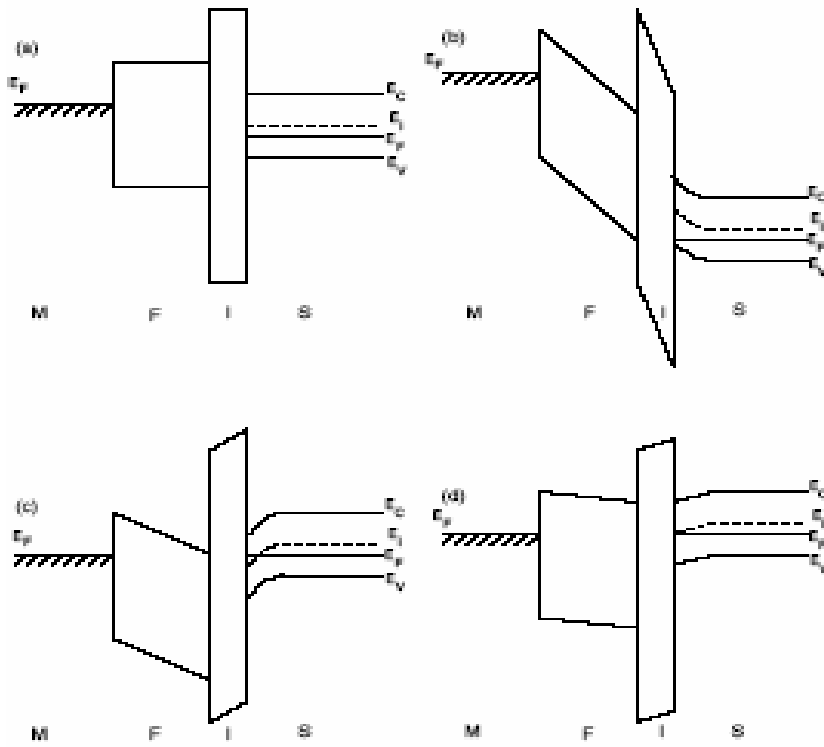


Şekil 2.13. Metal-ferroelektrik-yarıiletken yapının şematik gösterimi

Ferroelektrik malzeme ile yarıiletken arasına konulan yalıtkan tabaka, ferroelektrik malzemeyi ve yarıiletkeni birbirinden izole eder aynı zamanda yük geçişlerini de düzenler [44]. Şekil 2.14'de bir MFS yapının enerji bant diyagramları farklı çalışma bölgeleri için verilmektedir. Bir MFS yapıda geçide voltaj uygulandığında farklı sonuçları ortaya koyar.

Şekil 2.14a' da görüldüğü gibi V_{GB} (uygulanan geçit voltajı) = V_{FB} ' ye (flatband voltajı) eşit olduğunda, yarıiletkendeki enerji bantları düzdür, bükülmez. Bu durumda yarıiletkenin geçit elektrodunda yük bulunmaz. 2.14b' den açıkça görüldüğü gibi, $V_{GB} < V_{FB}$ olduğunda (yığılma bölgesi), pozitif yükler yarıiletkenin oksit tabakaya yakın yüzeyinde birikir, enerji bantlarında gözlenen bükülme yüzeye yakın olan yerlerde gözlenir ve sadece oksit tabakada voltajda azalma meydana gelir.

2.14c'de görüldüğü gibi $V_{FB} < V_{GB} < V_{TH}$ (treshold) (tüketim bölgesi), uzay yüklerinden dolayı yarıiletkenin içerisinde negatif yüklü bir alan oluşur ve artan voltajla bu alan da artar. Bu negatif yüklü bölge, alıcı mobil iyonların pozitif geçit voltajı ile örneğe doğru itilerek geride hareketsiz eksi yüklü iyonları bırakması sonucu meydana gelir. 2.14d'den ise $V_{GB} > V_{TH}$ (tersinim bölgesi) durumunda, elektronların iletim kanalı üst seviyede oluştuğu ve p-tipi yarıiletkenin, n-tipine dönüştüğü görülmektedir [66].



Şekil 2.14. Bir MFS yapı için farklı çalışma bölgeleri için enerji bant diyagramları kapasitans-voltaj ölçümlerinden yapının farklı bölgelerdeki durumu elde edilebilir.

Düşük frekans eğrisi elde etmek için yapı denge durumundayken kapasitans ölçülür. Yüksek frekans eğrisi için ise, düşük sinyal kapasitansı yavaş değişen, düşük genlikli yüksek frekanslı sinyal jeneratörü kullanılarak ölçümler gerçekleştirilir.

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Au/SrTiO₃/n-Si (MFS) Yapıların Hazırlanması

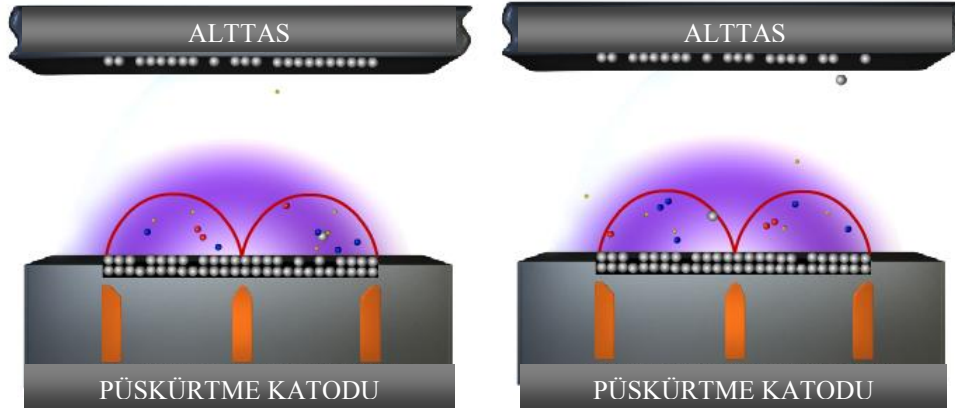
3.1.1. Kristal temizleme

İdeale yakın bir metal Schottky diyot hazırlayabilmek için yarıiletken kristalin mekanik ve kimyasal olarak çok iyi temizlenmesi gerekmektedir. İyi bir temizleme işlemi ile bir yarıiletken kristalde birçok sayıda yüzey kusuru ortadan kaldırılabilir. Kullanılan kristaller, yurt dışından CrysTec firmasından fabrikasyon yöntemiyle bir yüzeyi mekanik parlatılmış olarak satın alındığı için sadece kimyasal temizleme işlemi yapıldı. Kristal yüzeyindeki organik ve diğer kirlere temizlemek ve yüzeydeki pürüzleri gidermek için yarıiletken kristallerin tüm kimyasal temizleme ve durulama işlemleri ultrasonik banyo içinde gerçekleştirildi. Diyot yapımında (100) yüzey yönelimli, 0,07 Ω .cm öz dirençli, 300 μ m kalınlıklı, ¼ 3" çapında fosfor katkı (n-tipi) Si tek kristal alttaş kullanıldı. Bu çalışmada yarıiletken kristallerin temizlenmesinde RCA prosedürü uygulandı.

1. Organik Kirlenmelerin temizlenmesi,
2. Oksit tabakasının temizlenmesi,
3. İyonik kirlenmenin temizlenmesi,

3.1.2. Yalıtkan stronsiyum titanat (SrTiO₃) tabakasının RF püskürtme yöntemiyle oluşturulması

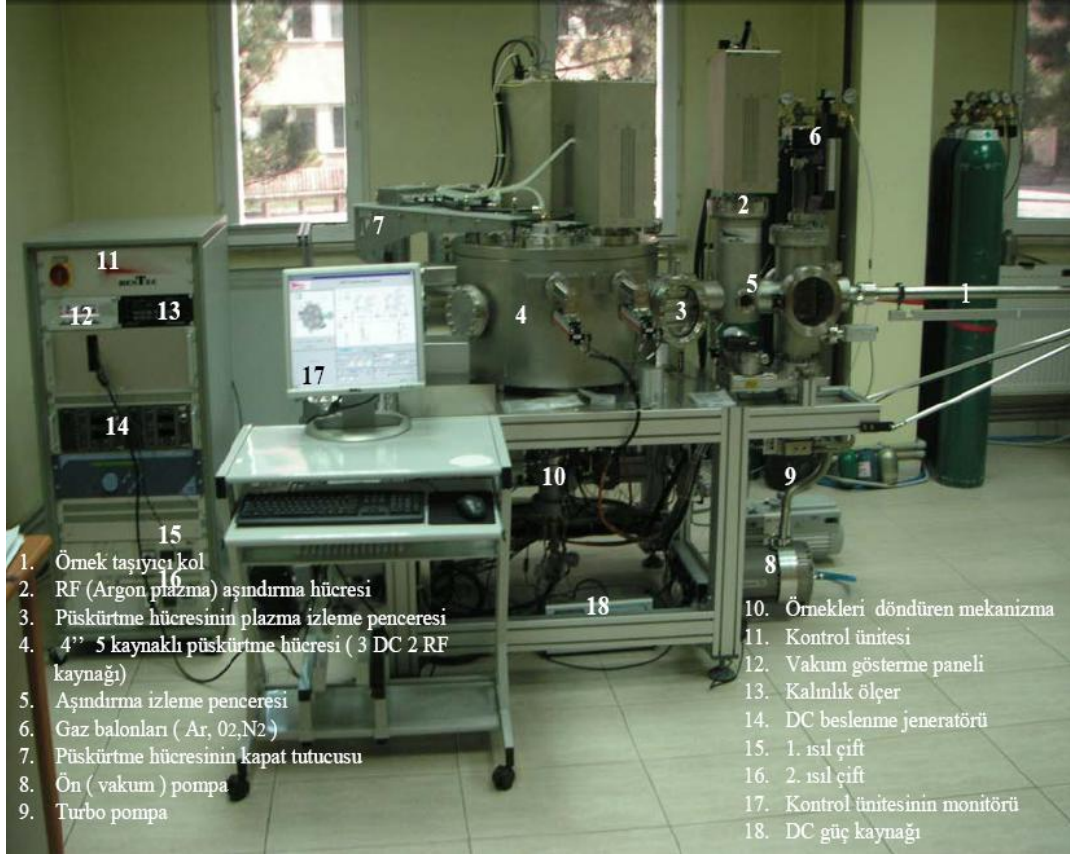
Püskürtme vakum ortamında fiziksel olarak hedef malzemenin (target) kaynağa ince film biriktirmek için yaygınca kullanılan sistemlerdendir. Bu sistemde yüksek gerilimle hızlandırılan iyonların hedef malzemenin yüzeyini bombardıman ederek söktükleri moleküllerin alttaş üzerine biriktirilir. Bu sistemin en büyük avantajlarından bir tanesi de düşük sıcaklıklarda biriktirme işlemi yapılabilmesidir dolayısıyla hemen her tür taban malzemeye istenilen malzeme biriktirebilir[66].



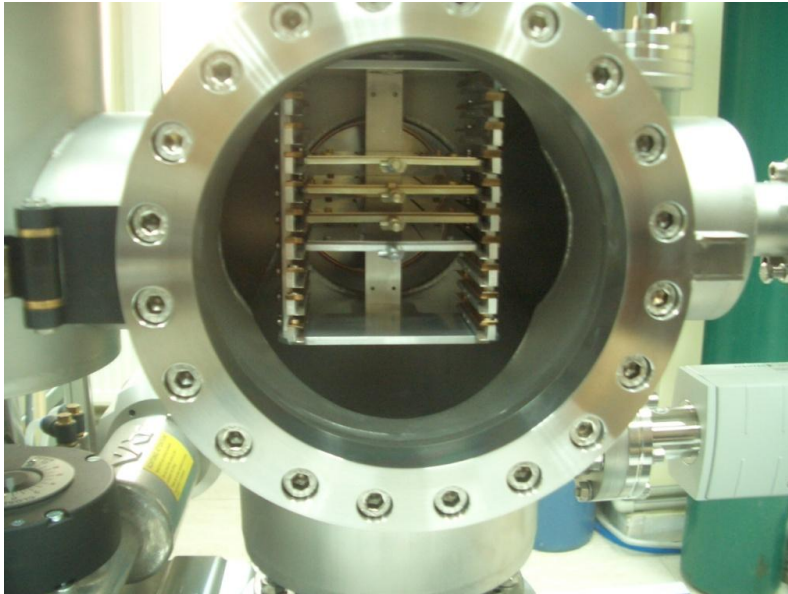
Şekil 3.1. (a) Ar^+ iyonlarının hedeften parçacıkların sökmesi, (b) sökülen parçacıkların altaşa (substrate) birikmesi.

Püskürtme sistemi çok çeşitli iletken, yarıiletken veya yalıtkan malzeme biriktirilmesine imkân tanır. İletken olan malzemeler DC Magnetron Püskürtme, yalıtkan olan malzemeler ise (Radyo Frekansı) RF Magnetron Püskürtme yöntemiyle biriktirilir. Bizim sistemimizde 2 RF kaynağı ve 3 tane DC güç kaynağı olup Resim 3.1’de açıkça görülmektedir [66].

Şekil 3.1’de mor renkle temsili gösterilen Ar^+ iyonlarından oluşturulan plazma ortamıdır. Turuncu renklerle gösterilen mıknatıslar elektronları manyetik alanda tutmayı ve Ar^+ iyonlarının hedef malzemeyi bombardıman etmesine yardımcı olmaktadır. Şekil 3.1(a) ve 3.1(b)’de gösterildiği gibi hedef malzemedan bir molekül kopmuş ve altaş yüzeyine yerleşmesi gösterilmiştir [66].



Resim 3.1. BESTEC firmasından alınan 3'' ultra yüksek vakuma sahip Püskürtme sistemi.



Resim 3.2. Püskürtme sisteminin yükleme odası ve yükleme rafları.

Resim 3.2’de açıkça görüldüğü gibi yükleme raflarına 10 adet numune yerleştirilebilmekte ve asansör sistemi ve taşıyıcı kol yardımıyla istenilen numune biriktirme odasına taşınmaktadır.

İnce film SrTiO₃ hazırlamak için temizlenen n-Si alttaş öncelikle yükleme odasına alındı ve ardından püskürtme odasına transfer edildi. Püskürtme odasının taban basıncı $\sim 10^{-5}$ mbar civarında iken alttaş 100 °C’ye ısıtıldı. SrTiO₃ hedeften (Kurt Lesker firmasından alınan seramik SrTiO₃ target) saniyede $\sim 0,3-0,5$ Å SrTiO₃ tabakası kaplandı. SrTiO₃ ince tabakanın kalınlığı 1500 Å olarak profiolometre yardımıyla tayin edildi. Püskürtme esnasında püskürtme basıncı $\sim 2 \times 10^{-3}$ mbar, hedef ile alttaş arasındaki mesafe 35 mm olacak şekilde sabitlendi. Böylece ~ 1500 Å kalınlığındaki SrTiO₃ ferroelektrik ince filmi n-Si alttaş üzerine başarılı bir şekilde kaplanmış oldu.

Çizelge 3.1. Au/SrTiO₃/n-Si büyütülmesine dair temel parametreler

Alttaş	n- tipi Silisyum
Hedef Malzeme	SrTiO ₃ Seramik
Büyüme Hızı	0,3-0,5 Å /sn
P _t	10 ⁻⁵ mbar
P _{Argon}	2,3 x 10 ⁻³ mbar
Sıcaklık	100 °C
RF Güç	300 Watt
Kalınlık	1500 Å

3.1.3. Omik kontağın oluşturulması

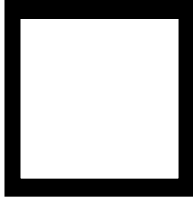
Au/SrTiO₃/n-Si yapılar veya diğer adıyla MFS tipi Schottky diyotların oluşturulması için gerekli omik ve doğrultucu kontaklar yüksek vakumlu metal buharlaştırma sistemi kullanıldı. Omik ve doğrultucu kontakların oluşturulmasında, Şekil 3.4’de şematik olarak gösterilen BESTEC marka yüksek vakum termal buharlaştırma sistemi kullanıldı. Omik ve doğrultucu kontakların oluşturulmasında kullanılan paslanmaz çelik maskeler ve flaman (tungsten) ultrasonik banyoda kimyasal olarak

iyice temizlenip durulandıktan sonra kuru nitrojen (N_2) gazı ile kurulandı. Omik kontağı oluşturmak için kimyasal olarak temizlenen yarıiletken mat yüzeyi aşağı gelecek şekilde maske üzerine yerleştirilerek hemen vakum ortamına alındı ve vakum 10^{-6} Torr değerine kadar düşürüldü.



Resim 3.3. Omik ve doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan vakumda buharlaştırma sistemi.

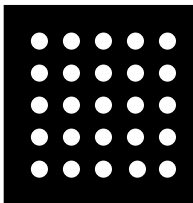
Omik kontaklar için Şekil 3.2’de gösterilen $1 \times 1 \text{ cm}^2$ alana sahip ve $\approx 500 \text{ }\mu\text{m}$ kalınlıklı paslanmaz çelik maske kullanıldı. Vakum $\approx 10^{-5}$ mbar’a ulaştığında, flaman üzerinden akım geçirilerek ($\approx 260 \text{ A}$) %99,999’luk saflığa sahip kimyasal olarak temizlenmiş altın (Au) tel buharlaştırıldı. Buharlaşmanın başlamasından kısa bir süre sonra kesici kapak (metal perde) yana açılarak, önceden ısıtılmış ($450 \text{ }^\circ\text{C}$) Si alttaşın mat yüzeyine $\approx 1500 \text{ \AA}$ kalınlığında Au kaplandı. Kapağın başlangıçta kristalin önünde durmasının nedeni, buharlaşabilecek yabancı maddelerin kristal üzerine birikmesini önlemektir. Omik kontak oluşturabilmek için yarıiletkenin mat yüzeyine buharlaştırılan Au, vakum ortamında $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de tavlansınarak Au’ın silisyum içerisine difuz etmesi sağlandı.



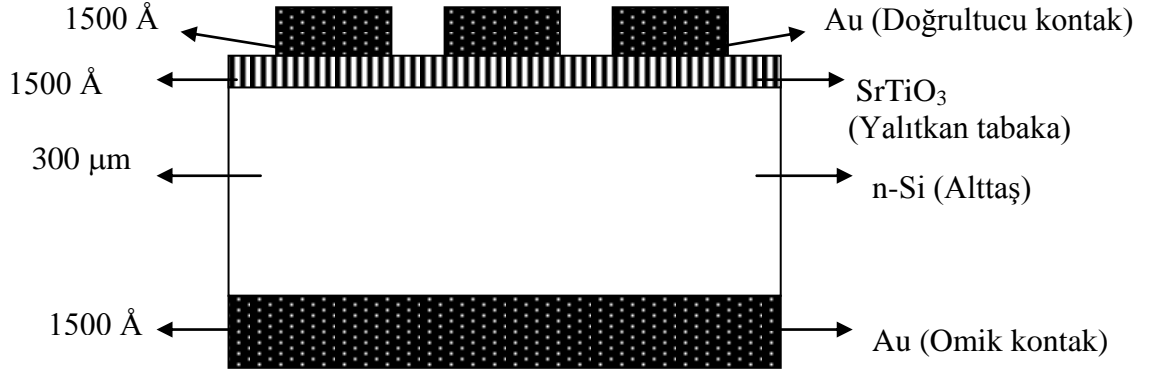
Şekil 3.2. Omik kontak oluşturulmasında kullanılan paslanmaz çelik maske.

3.1.4. Doğrultucu kontağın oluşturulması

Üzerine SrTiO_3 kaplanmış n-Si kristali, Şekil 3.3' de verilen maske üzerine parlak yüzeyi aşağı gelecek şekilde yerleştirildikten sonra flaman üzerine yerleştirilen kimyasal olarak temizlenmiş 1 mm çapında ve ≈ 1 cm uzunluğunda Au tel $\approx 10^{-5}$ mbar vakumda buharlaştırılarak, kristalin parlak yüzeyine 1mm çaplı ve ≈ 1500 Å kalınlığında Au doğrultucu kontaklar oluşturuldu. Böylece Şekil 3,3'te görülen MFS tipi Schottky diyotların fabrikasyon işlemi tamamlanmış oldu. Oluşturulan bu MFS yapılar, kriyostat içindeki numune tutucuya göre hazırlanan özel bir bakır levha üzerine omik kontak alta gelecek şekilde iletken gümüş pastası yardımı ile yapıştırdı. Daha sonra doğrultucu kontaklar üzerine iletken teller gümüş pasta tutturuldu ve böylece yapı elektriksel ölçümler için hazır hale getirildi. Bakır levha üzerine yerleştirilmiş MFS yapılar kriyostat içindeki tutucu üzerine monte edildi ve kriyostat vakuma alındı. Deneysel ölçümlerin vakumlanmış ($\approx 10^{-3}$ mbar) kriyostat içinde gerçekleştirilmesi sonucunda gürültü gibi dış etkenler minimize edildi.



Şekil 3.3. Doğrultucu kontak oluşturulmasında kullanılan 1 mm çaplı deliklere sahip paslanmaz çelik maske.



Şekil 3.4. Oluşturulan MFS tipi Au/SrTiO₃/n-Si yapının şematik gösterimi



Resim 3.4. Büyütülen MFS tipi Au/SrTiO₃/n-Si yapı

3.2. Kullanılan Ölçüm Düzenekleri

Tüm deneysel ölçümler, Gazi üniversitesi Fotonik Araştırma ve uygulama merkezinde gerçekleştirildi. Akım-gerilim (I-V) ölçümlerinde Keithley 2400 programlanabilir sabit akım kaynağı kullanıldı. Kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümlerinde ise Hewlett Packard 4192 A LF (5 Hz-13 MHz) empedans analizmetre kullanıldı. Ayrıca I-V, C-V ve G/ω -V ölçümlerinin tümü Janis VPF-475 kriyostat içinde alınmıştır. Tüm bu ölçümler bilgisayara takılan bir IEEE-488 AC/DC çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirildi. Akım-gerilim (I-V) ölçümleri, kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω -V) ölçümlerinin yapıldığı düzenekler sırasıyla Resim 3.5 ve Resim 3.6'da verildi.



Resim 3.5. Akım-gerilim ölçümleri için kullanılan deneysel ölçüm düzeniği.



Resim 3.6. Kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj ölçümleri için kullanılan deneysel ölçüm düzeniği .

4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Giriş

Hazırlanan Au/SrTiO₃/n-Si yapıların bazı temel elektriksel parametreleri akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) ölçümleri kullanılarak incelendi. C-V ve G/ω-V ölçümleri hem doğru hem de ters ön gerilim altında (-5 V ile + 5V) ve geniş bir frekans aralığında (10 kHz - 1 MHz) 80-300 K sıcaklık aralığında gerçekleştirildi. C-V ve G/ω-V ölçümlerinden yapının verici katkı atomlarının (N_D) yoğunluğu, difüzyon potansiyeli (V_D), Fermi enerji seviyesi (E_F), tüketim tabakasının (W_D) genişliği, metal ile yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliği (Φ_B(C-V)), yapının seri direnci (R_s) ve arayüzey durumlarının (N_{ss}) yoğunluğu elde edildi. 80-300 K sıcaklık aralığında doğru ön gerilim I-V ölçümlerinden ise yapının doyma akımı (I₀), idealite faktörü (n), potansiyel engel yüksekliği (Φ_B(I-V)) ve arayüzey durumlarının (N_{ss}) dağılım profili etkin potansiyel engel yüksekliği (Φ_e) dikkate alınarak elde edildi.

4.2. Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri

Metal ile yarıiletken arasına doğal ya da yapay olarak oluşturulmuş yalıtkan tabaka metal-yarıiletken (MS) yapıyı metal-yalıtkan/ferroelektrik-yarıiletken (MIS veya MFS) yapıya dönüştürür. Bu yapıların elektriksel karakteristikleri MS yapılara göre oldukça farklılık gösterir ve ideal durumdan sapmalara neden olur. Metal ile yarıiletken arasında ve yarıiletkenin üzerine büyütülen SiO₂, SnO₂ ve Si₃N₄ gibi küçük dielektrik sabitli materyaller ya da TiO₂, SrTiO₃ gibi yüksek dielektrik sabitli materyaller metali yarıiletkenden izole ederek metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişlerini düzenler. Genelde, bu arayüzey tabakanın kalınlığı (δ) 100 Å'dan küçük ise bu tip yapılar MIS yapı ve 100 Å'dan büyük ise MOS yapılar ya da kapasitörler diye adlandırılır [3,13]. Bu yapıların N_D, V_D, E_F, W_D, Φ_B(C-V), R_s ve N_{ss} gibi temel elektriksel parametreleri MS yapılara göre oldukça farklılıklar gösterir. Çünkü bu yapıların akım-iletim mekanizmaları ve performansı özellikle yapının hazırlanma

şartlarına, metal/yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliğinin homojensizliğine ve arayüzey tabakanın kalınlığı ile homojenliğine bağlıdır. Sıcaklık, yapı üzerine uygulanan gerilim ve yarıiletken kristalin gövde direnci gibi birçok parametre de yapının performansını oldukça etkilemektedir [25,46].

MS, MIS veya MFS tipi Schottky diyotlarında akım-voltaj ilişkisi $V \geq 3kT/q$ için termiyonik emisyon teorisine (TE) göre aşağıdaki şekilde verilir [14].

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

Burada V_D diyot üzerine düşen gerilim, n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık ve I_0 ise ters doyum akımı olup

$$I_0 = AA^{**} T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{Bo}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

eşitliği ile verilir. Burada Φ_{Bo} metal ile yarıiletken arasında oluşan sıfır beslem potansiyel engel yüksekliği, A diyodun doğrultucu kontak alanı ve A^{**} etkin Richardson sabiti olup değeri n-tipi Si için $120 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ 'dir [14]. Buna göre Eş. 4.2, Eş4.1'de yerine yazılırsa;

$$I = AA^{**} T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{Bo}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.3)$$

şekline dönüşür. Ancak köşeli parantez içindeki 1 rakamı üstel ifade yanında oda sıcaklığı ve üstündeki değerler için rahatlıkla ihmal edilebilir. Buna ilaveten, TE teorisine göre idealite faktörünün 1 olması beklenir. Ancak pratikte idealite faktörü, özellikle yalıtkan arayüzey tabakanın kalınlığı ve yasak enerji aralığında lokalize olan N_{ss} 'lerden dolayı 1'den büyük çıkmaktadır. İdealite faktörünün birden büyük olması metal ile yarıiletken (M/S) arasına büyütülen SrTiO_3 tabakasına, arayüzey

durumlarının büyüklüğüne, Schottky engel alçalmasına, M/S arasında oluşan potansiyel engel yüksekliğinin homojensizliğine ve fabrikasyon sırasında laboratuvar ortamında bulaşan muhtelif organiklerin varlığına atfedildi [46-48]. Metal yarıiletken arasında oluşan potansiyel engelinin homojensizliğinden dolayı sıcaklığa bağlıda önemli ölçüde değişmektedir [14,49]. Eğer yapı, yarıiletkenin gövde direnci, yalıtkan arayüzey tabakası ve kontaklardan dolayı bir seri dirence sahip ise Eş. 4.3 ifadesi,

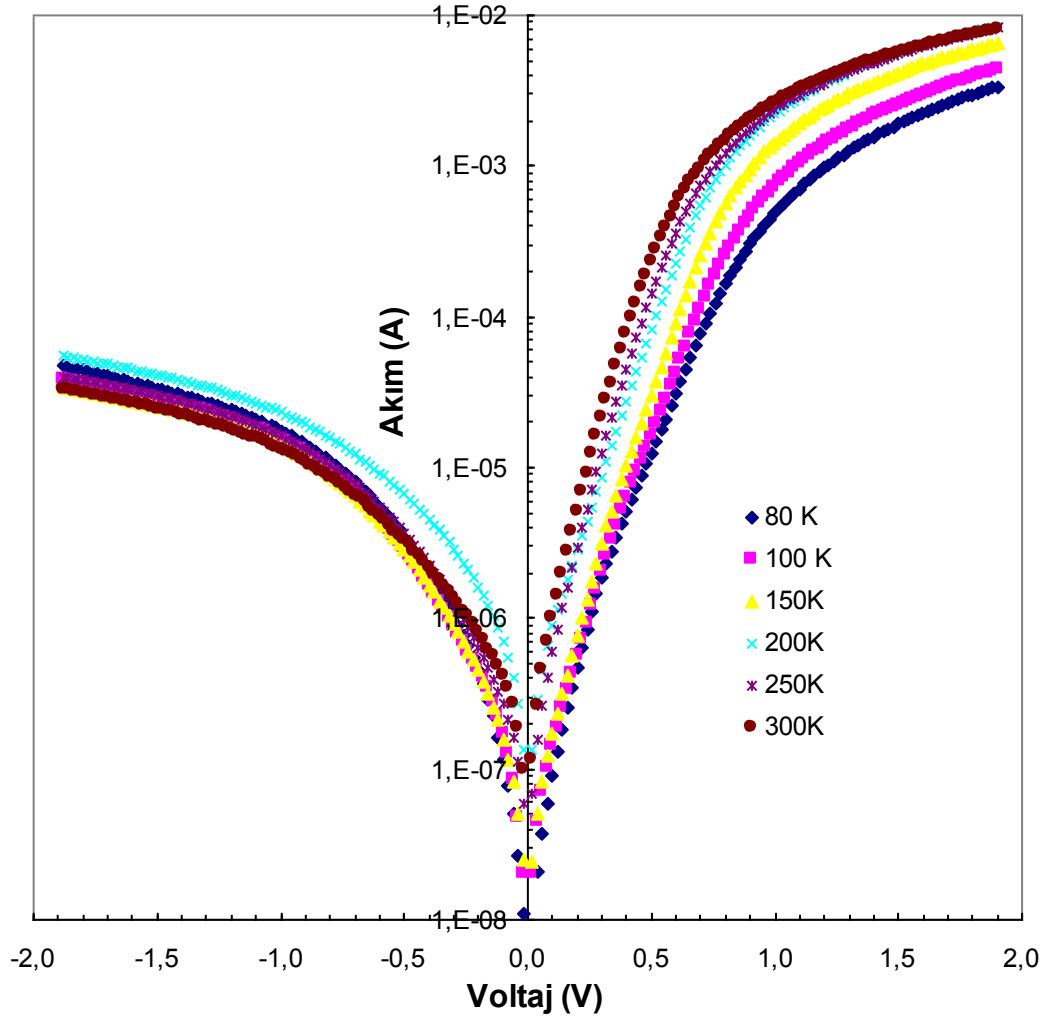
$$I = I_0 \exp \left(\frac{q}{nkT} (V - IR_s) \right) \quad (4.4)$$

şeklinde olacaktır. Burada IR_s terimi yapının seri direnci üzerine düşen voltajdır. Schottky diyotlarda $\ln I$ 'nin V 'ye göre grafiğinin genelde lineer bir doğru olması beklenir. Ancak deneysel sonuçlardan görüldüğü gibi yüksek voltajlarda ($V \geq 1$ V) R_s 'den dolayı $\ln I$ - V eğrisinde ideal durumdan sapmalar olur, yani R_s $\ln I$ - V eğrisinin bükülmesine yol açar. Grafiğin doğrusallıktan saptığı bölgede hem idealite faktörü 1'den büyük olacak hem de lineer bölgenin daralmasından dolayı hesaplamaların güvenilirliği azalacaktır.

Lineer bölge için Eş. 4.1 ifadesinin \ln 'i alınırsa,

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{q}{nkT} V_D \quad (4.5)$$

şeklinde bir doğru denklemi elde edilir. Au/SrTiO₃/n-Si (MFS) yapının 80-300 K sıcaklık aralığında doğru ve ters ön gerilim altındaki yarı-logaritmik akım-voltaj ($\ln I$ - V) eğrisi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. 80-300 K sıcaklık aralığında Au/SrTiO₃/n-Si yapısının I – V eğrisi

Yapının idealite faktörü n , Şekil 4.1(a)'daki $\ln I$ - V eğrisinin eğiminden ($\tan\theta = q/nkT$) yararlanılarak,

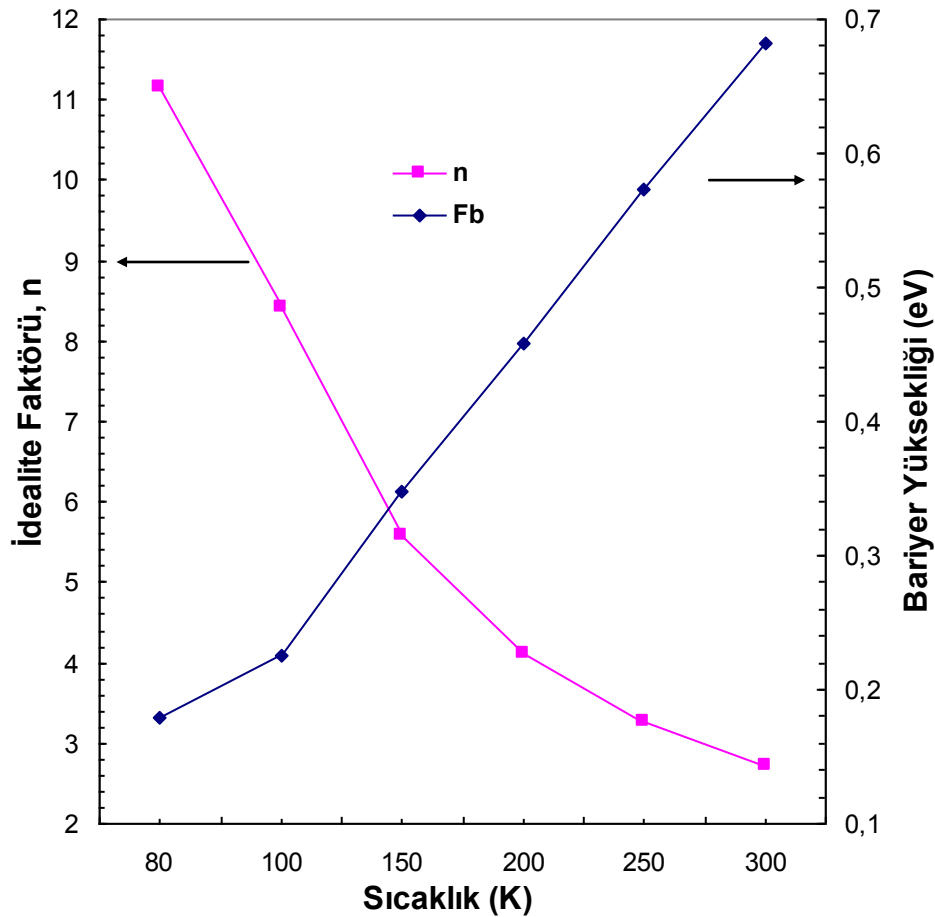
$$n = \frac{q}{kT \tan \theta} \quad (4.6a)$$

hesaplandı. Ayrıca idealite faktörünün voltaja bağlı değişimi de Eş. 4.4'den yararlanılarak,

$$n(V) = \frac{qV}{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)kT} \quad (4.6b)$$

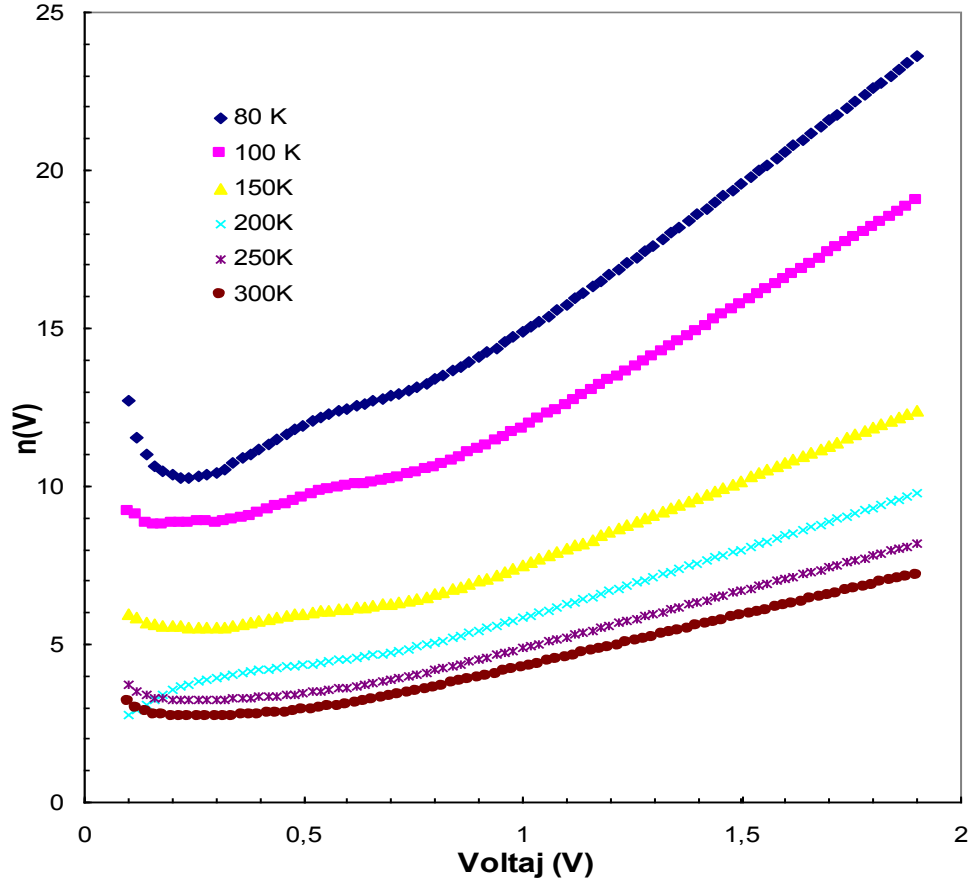
elde edildi ve Şekil 4.2’de verildi. İdealite faktörü artan sıcaklığa bağlı olarak azalırken, bariyer yüksekliği ise artmaktadır. I_o doyma akımı değeri ise $\ln I-V$ grafiğinin lineer bölgesinin uzantısının $\ln I$ eksenini sıfır voltajda kestiği noktadan elde edildi. I_o , diyodun doğrultucu kontak alanı (A) ve etkin Richardson sabiti (n -tipi Si için $120 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$) değerleri kullanılarak potansiyel engel yüksekliği (Φ_B) Eş 4.2’den yararlanılarak hesaplandı.

$$\Phi_B(I-V) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA * T^2}{I_o}\right) \quad (4.7)$$



Şekil 4.2. Au/SrTiO3/n-Si yapısının idealite faktörü (n) ve etkin potansiyel (Φ_e) eğrileri

Arayüzey durumlarının yasak enerji aralığındaki dağılım profilini elde etmek için voltaja bağlı etkin potansiyel engel yüksekliği Φ_e ve idealite faktörü değerleri elde edilerek Şekil 4.3 ve Çizelge 4.3’de verildi. Şekilden ve çizelgeden görüldüğü gibi hem Φ_e hem de n değerleri artan gerilime bağlı olarak artmaktadır.



Şekil 4.3. 80-300 K sıcaklık aralığında Au/SrTiO₃/n-Si yapısının $n_{(V)}$ – V eğrisi

Çizelge 4.1. Au/SrTiO₃/n-Si yapısı için 80-300 K sıcaklıkları arasında ki doğru ön gerilim I-V verilerinden elde edilen bazı temel parametrelerinin değişimi.

	80 K	100 K	150 K	200 K	250 K	300 K
Eğim	13	13,706	13,86	14,125	14,209	14,242
n(V)	11,14827	8,459217	5,576817	4,104143	3,263904	2,713618
K.noktası	-17,357	-17,016	-16,861	-16,037	-15,566	-15,014
I_o	2,9E-08	4,07E-08	4,76E-08	1,08E-07	1,74E-07	3,02E-07
Fb₀	0,179823	0,225687	0,347016	0,4584	0,572467	0,682112

Metal n-tipi bir yarıiletken arayüzey durumlarının enerjisi (E_{ss}), iletim bandının tabanına göre,

$$E_c - E_{ss} = q(\Phi_e - V) \quad (4.8)$$

eşitliği ile verilir. Yasak enerji aralığında ve M/S arayüzeyi yakınında yerleşmiş arayüzey durumlarının ($E_c - E_{ss}$) aralığındaki dağılım profili, doğru ön gerilim I-V ölçümlerinden engel yüksekliğinin (Φ_e) gerilime bağlı olduğu dikkate alınarak elde edildi ve Şekil 4.4'de verildi. Bir MIS veya MFS yapıda M/S arasındaki arayüzey tabakanın kalınlığı (δ), $\sim 30 \text{ \AA}$ 'dan küçük ise arayüzey durumları metal ile dengede olurlar, $\sim 30 \text{ \AA}$ 'dan büyük ise arayüzey durumları yarıiletken ile dengede olurlar [14]. İdealite faktörünün arayüzey durumları ve arayüzey tabakasının kalınlığı (δ) cinsinden ifadesi;

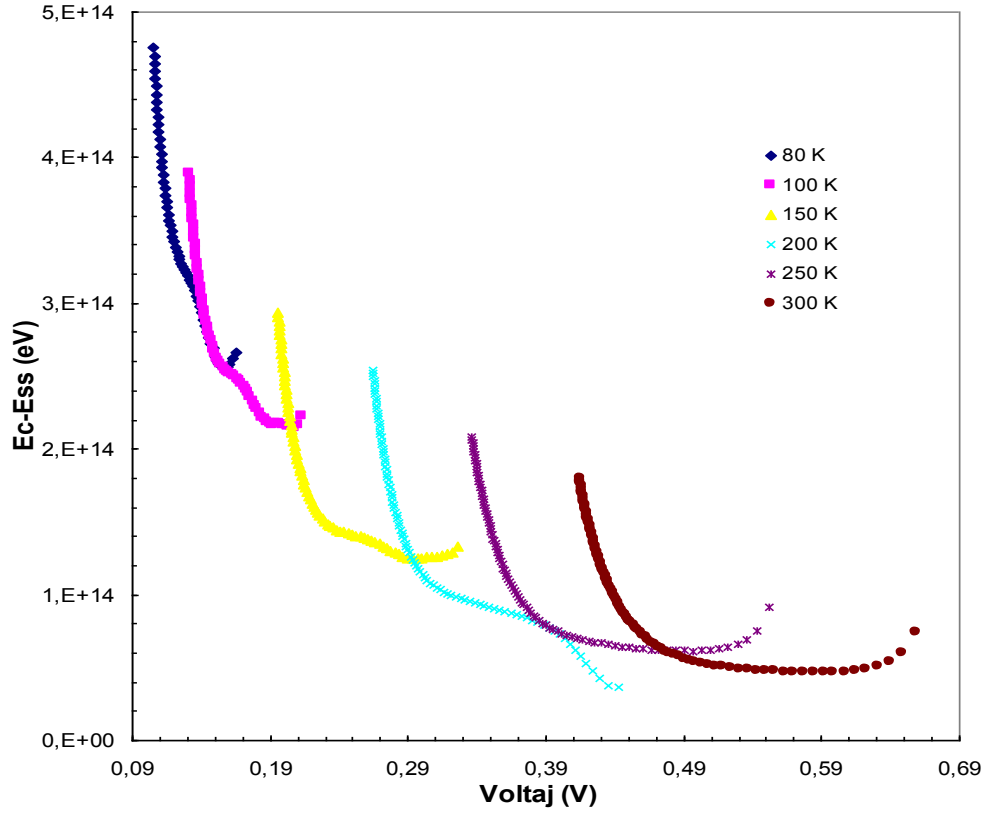
$$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left[\frac{\epsilon_s}{W_D} + qN_{ss}(V) \right] \quad (4.9)$$

eşitliği ile verilir [13,20,28]. Burada δ ara yüzey tabaka kalınlığı, W_D tüketim tabakasının kalınlığı, ϵ_s ve ϵ_i ise sırasıyla yarıiletkenin ve arayüzey tabakanın dielektrik sabitleridir. M/S arasına n-Si yüzeyi üzerine büyütülen SrTiO₃ tabakanın kalınlığı δ , yüksek frekanstaki (1 MHz) C-V ölçümleri kullanılarak, $C_{ox} = \epsilon_i \epsilon_o A / \delta$

eşitliğinden $\delta=590 \text{ \AA}$ olarak elde edildi. Burada n-tipi Si için $\epsilon_s= 11,8\epsilon_o$, $\epsilon_i = 50 \epsilon_o$ ve boşluğun dielektrik $\epsilon_o=8.85 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$ alındı [14,15,53]. Eş.4.9'dan görüldüğü gibi idealite faktörü arayüzey tabakasının kalınlığı ve arayüzey durumlarının büyüklüğü ile doğru orantılı ve tüketim tabakasının kalınlığı ile ters orantılıdır. Bu üç parametre, yapının ideal durumdan sapmasına önemli ölçüde neden olur. Eş. 4.9'dan yararlanılarak gerilime bağlı $N_{ss} (V)$ değerleri,

$$N_{ss} (V)= \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{\delta} ((n(V)-1) - \frac{\epsilon_s}{W_D}) \right] \quad (4.10)$$

eşitliğinden elde edildi [16,53]. Eş. 4.8 ve Eş. 4.10 kullanılıp, arayüzey durumlarının enerjiye bağlı dağılım profili elde edilerek Şekil 4.3' de verildi. Şekilden görüldüğü gibi N_{ss} 'lerin E_c-E_{ss} aralığındaki dağılımı, iki minimum değere sahip olup iletim bandına doğru üstel olarak artmaktadır. Literatürde de benzer sonuçlar gözlenmiş ve bu dağılım türü U şekli olarak tanımlanmıştır [14,53]. Bu davranış arayüzey durumlarının yasak enerji aralığındaki özel bir dağılımına atfedilebilir [53-55]. Hazırlanan Au/SrTiO₃/n-Si yapıların yasak enerji aralığındaki dağılım değerleri yaklaşık $10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ mertebesinde bulundu. Bu sonuçların mevcut literatür ile uyum içinde olduğu söylenebilir.



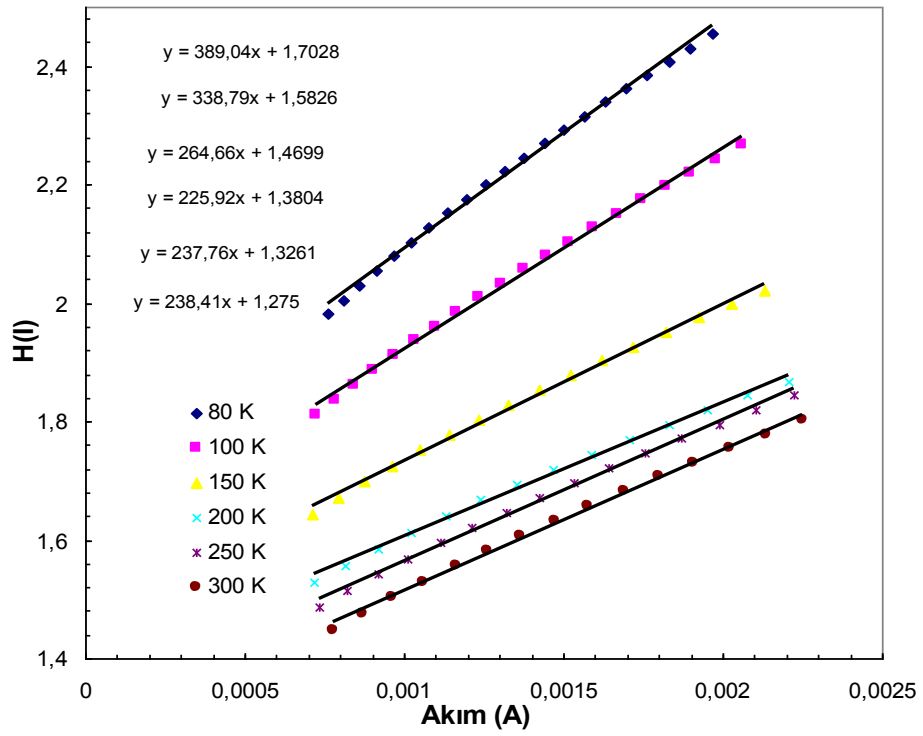
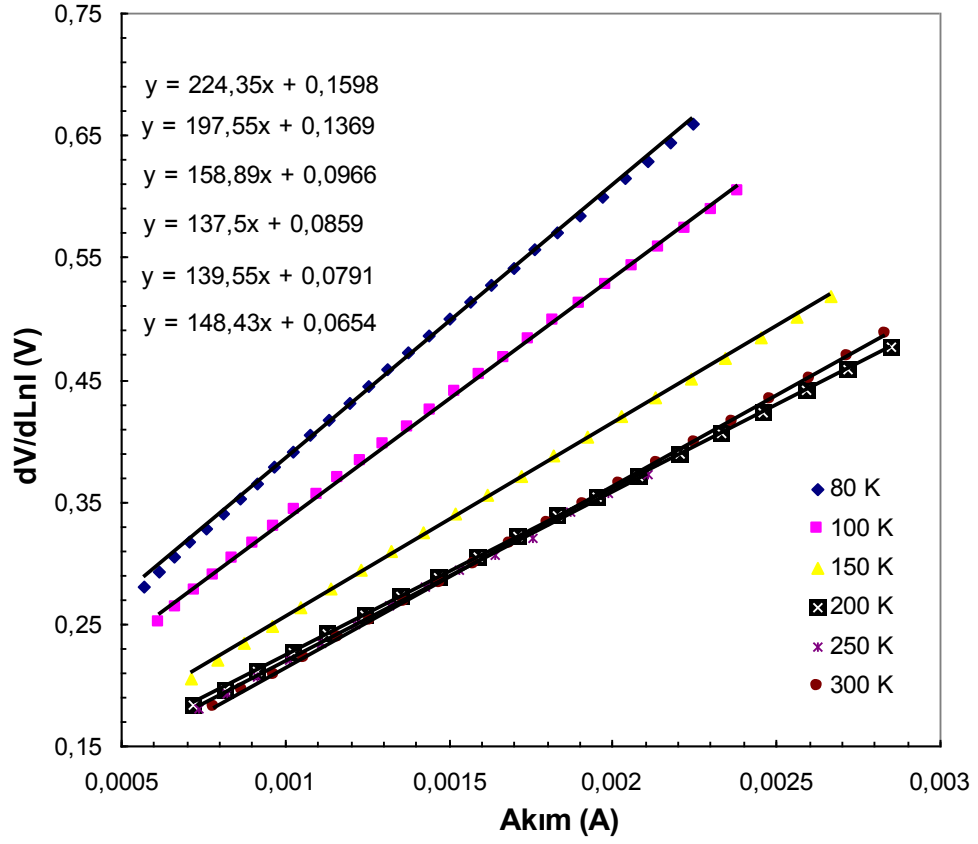
Şekil 4.4. 80-300 K sıcaklık aralığında I - V ölçümlerinden elde edilen arayüzey durumlarının profili

Au/SrTiO₃/n-Si yapının oda sıcaklığındaki R_s değeri Cheung metodu kullanılarak doğru beslem I-V grafiğinin yüksek voltaj değerlerinde büküldüğü kısımdan ($V > 1V$) aşağıdaki denklemler yardımıyla,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = n \frac{kT}{q} + R_s I \quad (4.11)$$

$$H(I) = V - n \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) = n\Phi_B + R_s I \quad (4.12)$$

elde edildi [56, 57]. Au/SrTiO₃/n-Si yapının oda sıcaklığındaki $dV/d\ln(I)-I$ ve $H(I)-I$ grafikleri Şekil 4.5'te verildi. Şekilden görüldüğü gibi $dV/d\ln(I)-I$ ve $H(I)-I$ eğrisi bir doğru vermektedir ve bu doğruların eğiminden oda sıcaklığında ki R_s değeri sırasıyla 148,43 ve 238,41 Ω olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.5. 80-300 K sıcaklık aralığında Au/SrTiO₃/n-Si yapının Cheung fonksiyonları

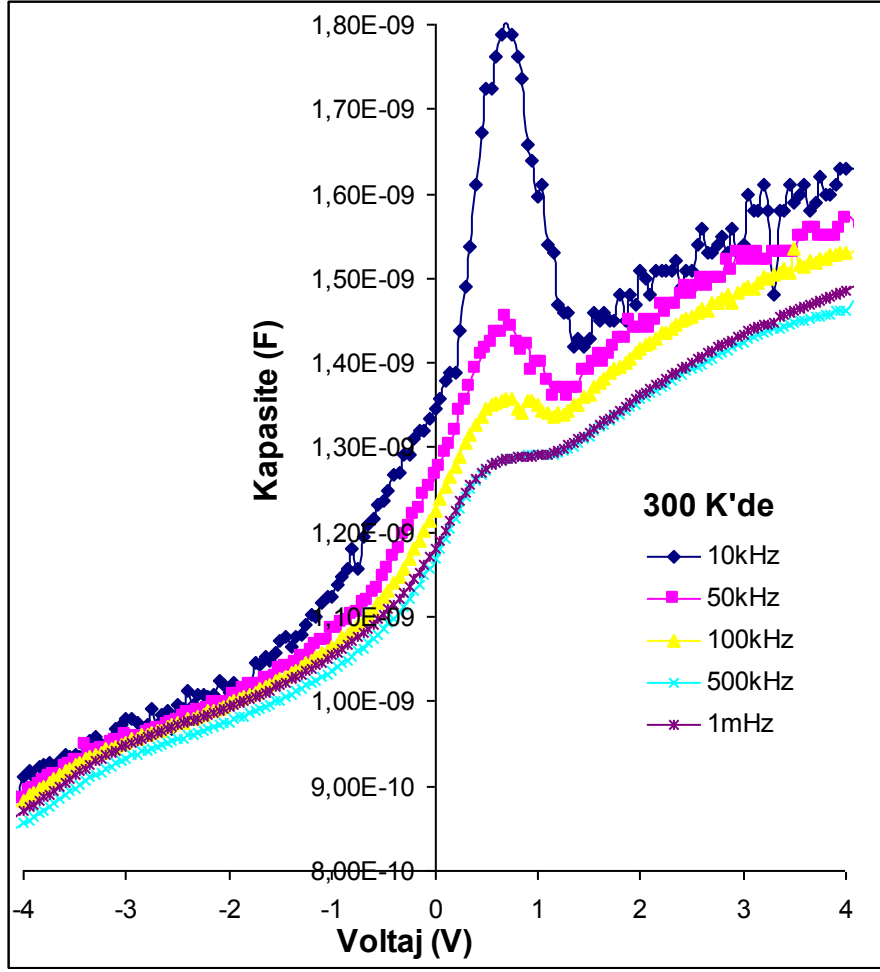
4.3. Frekansa Bağlı Kapasite-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/ω-V)

Karakteristikleri

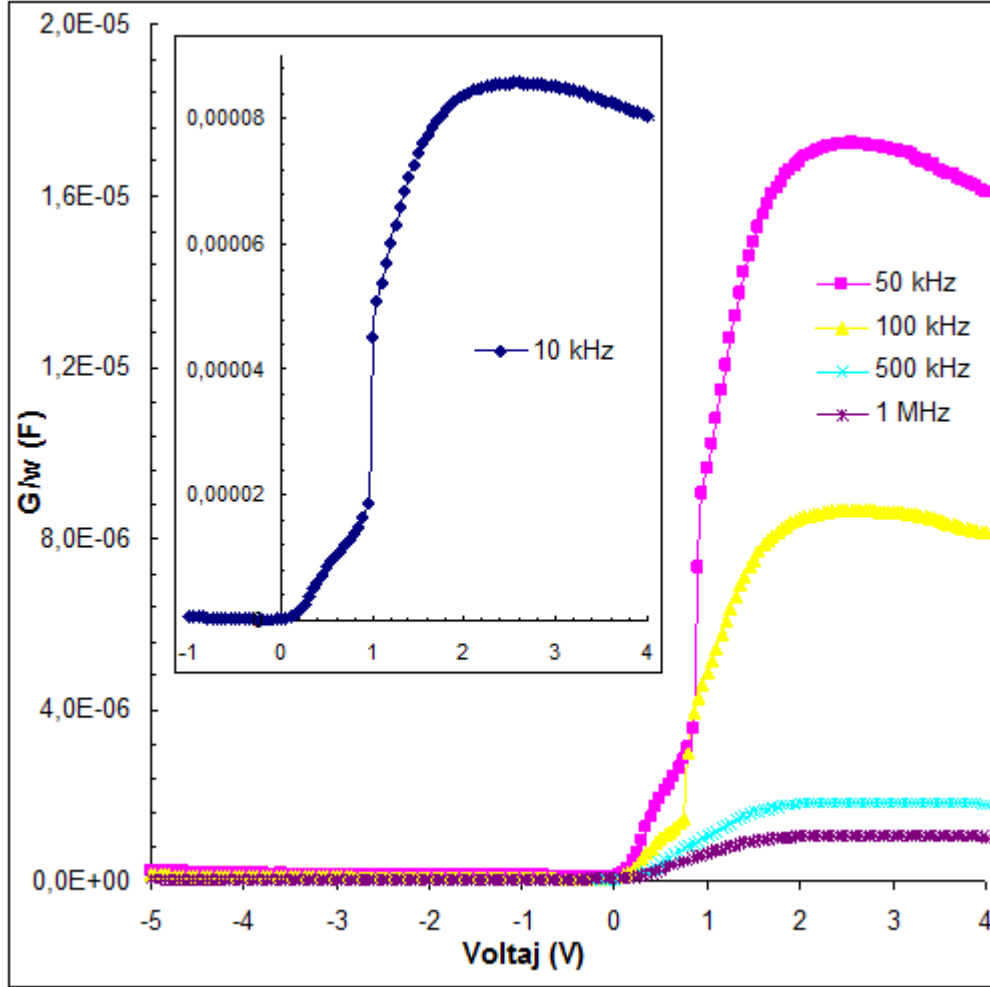
Au/SrTiO₃/n-Si yapının oda sıcaklığında ve geniş bir frekans aralığında (10 kHz–1MHz) elde edilen deneysel C-V ve G/ω-V ölçümleri sırasıyla Şekil 4.6 ve 4.7’de verildi. Şekil 4.6’dan görüldüğü gibi, C-V eğrileri terslenim-tüketim-yığılma bölgelerine sahiptir. Yani tipik bir MIS karakteristiği sergilemektedirler. C değerleri genelde tersinim bölgesinden yığılma bölgesine doğru artan voltajla artmakta ve ~0,7 V’da pik vermektedir. Bu pikin varlığı arayüzey durumlarının yasak enerji aralığındaki özel bir dağılımına atfedilebilir. Kuvvetli yığılma bölgesindeki aşağı doğru bükülme ise seri direncin varlığına ve büyüklüğüne atfedilebilir. Ayrıca Şekil 4.6 ve 4.7’de görüldüğü gibi C ve G/w değerleri frekansa oldukça bağlı olup özellikle tüketim ve yığılma bölgesinde frekansın etkisi daha fazladır. Yeterince küçük negatif voltajlarda (tersinim bölgesi) C ve G/w değerlerinde önemli bir değişme olmayıp bu bölgede voltajın C ve G/w değerlerine etkisi hemen hemen hiç yoktur.

Eğer MIS veya MOS yapılarda, C-V ve G/ω-V ölçümleri yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) alınırsa arayüzey durumları (N_{ss}) uygulanan dış a.c. sinyali takip edemez ve dolayısıyla hem C hemde G/w değerlerine bir katkı getirmez [15].

Gerilimin kapasitans ve iletkenlik değerleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla farklı voltajlarda frekansa bağlı C ve G/w eğrileri Şekil 4.7’de verildi. Şekillerden görüldüğü gibi kapasitans ve iletkenlik değerleri voltaj arttıkça artmaktadır.



Şekil 4.6. 300 K sıcaklığında Au/SrTiO₃/n-Si yapısının 10 kHz- 1 MHz frekans aralığında ki C-V eğrisi



Şekil 4.7. Au/SrTiO3/n-Si yapısının 10kHz- 1 MHz frekans aralığında G/w-V eğrileri

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi her bir frekans için C^{-2} -V eğrileri lineer olan kısımdan fit edildi. C^{-2} -V karakteristikleri 500kHz- 1 MHz için aşağıdaki eşitliklerle hesaplandı [58,59].

$$C^{-2} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 N_D} (V_o + V) \quad (4.13)$$

Burada A diyot alanı, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, N_D donör taşıyıcı yoğunlu, V ters beslem voltajıdır. V_o değerleri ise Eş 4.14’den yararlanılarak, C^{-2} -V eğrilerinin

voltaj eksenini kestiği noktadan hesaplandı. Bu değerlerden yararlanılarak da V_D difüzyon potansiyeli elde edildi.

$$V_o = V_D - \frac{kT}{q} \quad (4.14)$$

Engel yüksekliği değerleri Şekil 4.7'den yararlanılarak elde edilebilir.

$$\Phi_B(C-V) = V_D + E_F - \Delta\Phi_B \quad (4.15)$$

Burada E_F , bulk Fermi seviyesi ile iletkenlik band kenarı arasındaki enerji farkıdır. $\Delta\Phi_B$ imaj kuvveti engel düşmesidir [14,15,58] ve Eş 4.16'deki gibi verilir,

$$\Delta\Phi_B = \left[\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_o} \right]^{1/2} \quad (4.16)$$

E_m ise elektrik alandır ve aşağıdaki gibi verilir:

$$E_m = \left[\frac{2qN_D V_o}{\epsilon_s\epsilon_o} \right]^{1/2} \quad (4.17)$$

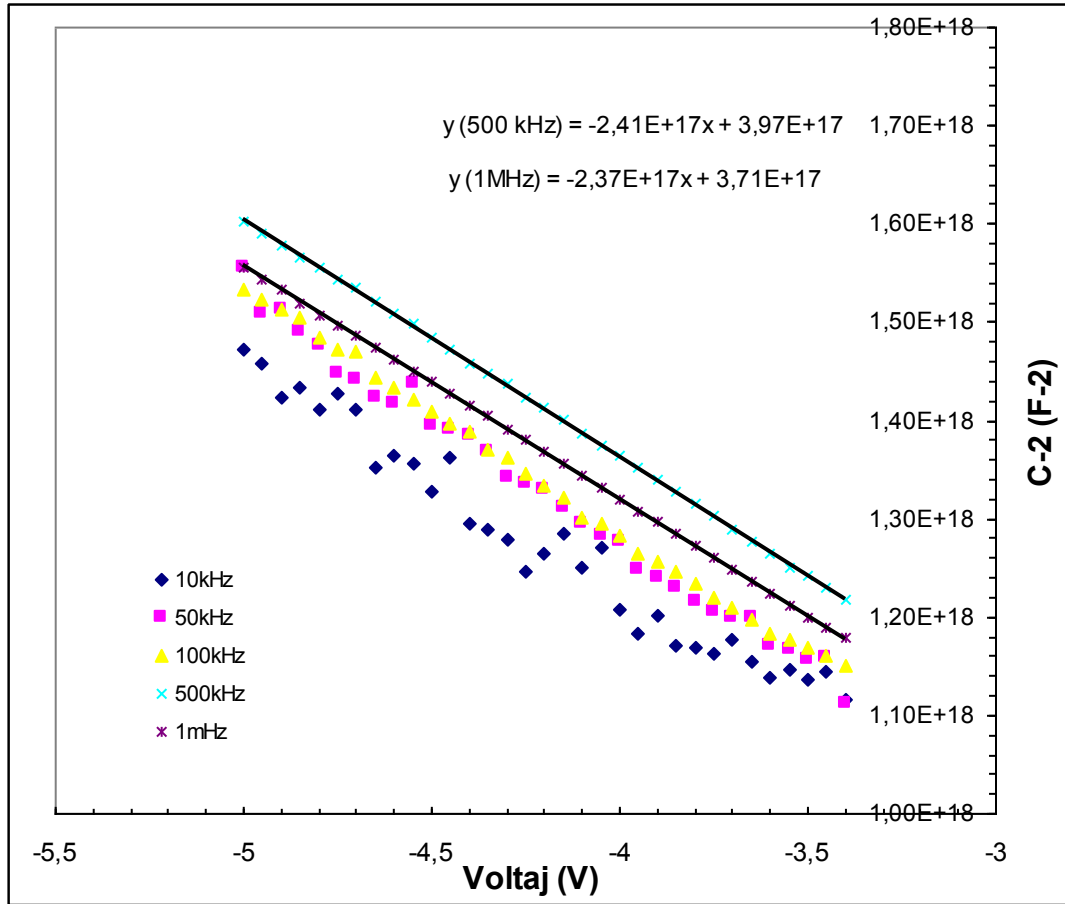
E_F enerjisi ise aşağıdaki eşitlikten hesaplandı.

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln(N_C / N_D) \quad (4.18)$$

Burada N_C , n-Si için iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğudur ve

$$N_C = 4,82 \times 10^{15} T^{3/2} (m_e^* / m_o)^{3/2} \quad \text{ve} \quad (m_e^* / m_o) = 0,55 \quad (4.19)$$

Şeklinde ifade edilir. Bu eşitlikte m_e^* elektronların etkin kütlesi ve m_0 elektron kütlesidir. $V_0(V)$, Eğim, N_d , W_d , E_f ve F_b değerleri C^{-2} -V eğrilerinden belirlendi ve Çizelge 4.2'de sırasıyla verildi.



Şekil 4.8. Frekansa bağlı C^{-2} -V eğrileri

Çizelge 4.2. 500 kHz frekansında Au/SrTiO₃/n-Si yapısı için C-V karakteristiklerinden elde edilen bazı temel parametreler.

	V_0 V	Eğim	N_d	W_d cm	E_f eV	F_b eV
500 kHz	0,607	$2,41 \times 10^{17}$	$3,17 \times 10^{16}$	$7,99 \times 10^{-5}$	$1,70 \times 10^{-1}$	0,80

5. SONUÇ

RF püskürtme metoduyla hazırlanmış Au/SrTiO₃/n-Si (MFS) yapının temel elektriksel karakteristikleri 80-300 K sıcaklığında akım-voltaj (I-V), kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) deneysel ölçüm metotları kullanılarak belirlendi. Hazırlanan yapının C-V ve G/ω-V ölçümleri geniş bir frekans aralığında (10-1000 kHz) sıcaklığa bağlı gerçekleştirildi. Burada amaç hazırlanan bu MFS yapıların idealite faktörü (n), sıfır-beslem potansiyel engel yüksekliği (Φ_{B0}), yapının seri direnci (R_s) ve arayüzey durumları (N_{ss}) gibi temel elektriksel parametrelerini hesaplamak ve bunların MFS yapılar üzerine etkisini açıklamaktır.

Lineer bölgeden faydalanılarak Au/SrTiO₃/n-Si (MFS) yapının yapının temel elektriksel parametreleri olan idealite faktörü (n), potansiyel engel yüksekliği (Φ_B) ve doyum akımı (I₀) hesaplandı. n ve etkin potansiyel yüksekliği (Φ_e)'nin voltaja bağlı değişimi Şekil 4.3'de hem de Çizelge 3'de verildi. Şekilden ve çizelgeden de görüldüğü gibi hem Φ_e hem de n değerleri artan gerilime bağlı olarak artmaktadır.

Arayüzey durumları, arayüzey oksit/yalıtkan tabakanın kalınlığına bağlı olarak metal veya yarıiletken ile yük alışverişinde bulunurlar. Genelde yalıtkan tabaka ince ise (δ_{ox} ≤ 30 Å) arayüzey durumları metal ile dengede ve yalıtkan tabaka kalın ise (δ_{ox} ≥ 30 Å) yarıiletken ile dengededir denilir [14]. Hazırlanan MFS yapılarda yalıtkan arayüzey tabakasının kalınlığı profilometre ile ~ 1500 Å ölçüldü. Arayüzey durumlarının (N_{ss}), E_c-E_{ss} enerji aralığındaki dağılım profili doğru beslem I-V ölçümlerinden elde edildi ve Şekil 4.4'te verildi. Şekilden görüldüğü gibi N_{ss}'lerin E_c-E_{ss} aralığındaki dağılımı, iki minimum değere sahip olup iletim bandına doğru üstel olarak artmaktadır. N_{ss}'lerin değerleri yaklaşık 10¹⁴ eV⁻¹.cm⁻² mertebesinde bulundu. Bu sonuçların mevcut literatür ile uyum içinde olduğu söylenebilir.

Au/SrTiO₃/n-Si yapının 80-300 K Sıcaklık aralığında R_s değeri Cheung [56] metodu kullanılarak doğru beslem I-V grafiğinin yüksek voltaj değerlerinde hesaplandı. Au/SrTiO₃/n-Si yapının oda sıcaklığındaki $dV/d\ln(I)$ -I ve H(I)-I grafikleri Şekil 4.5'te verildi. Şekilden görüldüğü gibi $dV/d\ln(I)$ -I ve H(I)-I eğrisi bir doğru vermektedir ve bu doğruların 300 K'deki eğiminden R_s değeri sırasıyla 148,43 ve 238,41 Ω elde edilmiştir.

Au/SrTiO₃/n-Si (MFS) yapının C-V ve G/ω -V eğrileri frekansa bağlı olarak çizildi ve sırasıyla Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verildi. Bu eğrilerde gözlenen pik ve yarımaların hem frekansa hem de uygulanan dc gerilime bağlılık göstermesinin sebebi arayüzey durumlarının özel dağılım profiline atfedildi. Düşük frekans bölgelerinde, arayüzey durumları ac sinyali takip edebildiğinden dolayı C-V ve G/ω -V değerlerine ilave bir katkı getirmektedir [15,29]. Artan frekansla arayüzey durumlarının katkısı azalmakta ve yaklaşık $f \geq 500$ kHz' den sonra hemen hemen hiçbir katkı gelmemektedir. Dolayısıyla numunenin daha gerçekçi elektriksel parametrelerini hesaplamak için C-V ve G/ω -V ölçümlerinin yüksek frekanslarda ($f \geq 500$ kHz) yapılması daha güvenilir olacaktır [16, 29].

C-V ve G/ω -V eğrilerinde frekansa bağımlılığın dışında uygulanan dc gerilime bağlılık da gözlenmektedir. Şekil 4.7'den görüldüğü gibi kapasitans ve iletkenlik değerleri voltaj arttıkça artmakta yeterince ileri voltajlarda ise fazla değişmemektedir.

KAYNAKLAR

1. Wolfram, T., Ellialtıoğlu Ő., “Electronic and Optical Properties of d-Band Perovskites”, *Chambridge University Press*, 20-45 (2006).
2. Dawber, M., Rabe, K.M., Scott, J.F., “Physics of thin-film ferroelectric oxides”, *Rev. of Mod. Phys.*, 17:1083-1124 (2005).
3. Tasch, A.F., Parker, L.H., “Memory cell and technology issues for 64- and 256-Mbit one-transistor cell MOSD DRAMs”, *Proc. of the IEEE*, 77:374-388 (1989).
4. Joshi, P.C., Krupanidhi, S.B., “Structural and electrical characteristics of SrTiO₃ thin films for dynamic random access memory applications”, *J.Appl. Phys.*, 73:7627-7631 (1993).
5. Kamalasanan, M.N., Kumar, N.D., Chandra, S., “Structural, optical, and dielectric properties of sol-gel derived SrTiO₃ thin films” *J.Appl. Phys.*, 74:679-683 (1993).
6. Wilk, G.D., Wallace, R.M., Anthony, J.M., “High-κ gate dielectrics: Current status and materials properties considerations”, *J.Appl. Phys.*, 89:5243-5275 (2001).
7. Eisenbeiger, K., Finder J.M., Z. Yu, Ramdani, J., Curless, J.A., Hallmark J.A., Droopad, R., Ooms, W.J., Salem, L., Bradshaw S., Overgaard C.D., “Field effect transistors with SrTiO₃ gate dielectric on Si”, *Appl. Phys. Lett.*, 76 (10):1324-1326 (2000).
8. Guigues B, Guillan J, Defay E, “SrTiO₃/BaTiO₃ multilayers thin films for integrated tunable capacitors applications”, *Journal of the European Ceramic Society*, 27 (13):3851-3854 (2007).
9. Song, M.H., Lee, Y.H., Hahn, T.S., Oh, M.H., Yoon, K.H.J., “Effects of a new stacking method on characteristics of multilayered BaTiO₃ thin film”, *J. Appl. Phys.*, 79:3744-3748 (1996).
10. Hahn, Y.B., Kim, D.O.J., “Structural and electrical properties of SrTiO₃ thin films prepared by plasma enhanced metal organic chemical vapor deposition”, *J. of Vac. Sci. Technol. A-Vac. Surf. and Films*, 17:1982-1986 (1999).
11. Tsurumi, T., Suzuki, T., Yamaze, T., Daimon, M., Jpn, M., “Fabrication of barium-titanate strontium-titanate artificial superlattice by atomic layer epitaxy”, *Japan. J.Appl. Phys.*, 33:5192-5195 (1994).
12. Klee, M., Mackens, U., “Sol-gel and MOD processing of layered perovskite and SrTiO₃ films” *Microelectron. Eng.*, 29:185-188 (1995).

13. Cowley, A.M., Sze, S.M., "Surface State and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems", *J. Appl. Phys.*, 36:3212-3216 (1965).
14. Sze, S.M., "Physics of Semiconductor Devices 2nd ed.", *John Willey & Sons*, New York, 245-300, 362-390 (1981).
15. Nicollian, E. H., Brews, J. R. "Experimental evidence for interface trap properties", MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) Physics and Technology", *John Willey and Sons*, New York, 285-318 (1982)
16. Taşçıoğlu, İ., "Al/SiO₂/p-Si (MIS) Yapılarda Temel Fiziksel Parametrelerin Frekans Ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 35-43, (2008).
17. Yücedağ, İ., "Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) yapılarda elektrik ve dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansa bağlı incelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1,9-10 (2007).
18. Song, Y.P., Van Meirhaeghe, R.L., Laflère, W.H., Cardon, F., "On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers", *Solid State Electron.*, 29:633-638 (1986).
19. Mui, D., Striteon, S., Markoç, H., "On the barrier lowering and ideality factor of ideal Al/GaAs Schottky diodes", *Solid State Electron.*, 34: 1077-1082 (1991).
20. Berger, L.I., "Semiconductor Materials", *CRC Press*, New York, 145-152 (1997).
21. Hahn B.R, Yoon D.Y, "Electrical and Interfacial Properties Of Metal-Polyamide-Silicon Structure", *Journal Of Applied Physics*, 65(7): 2766-2771 (1989).
22. Jarzebski, Z. M., "Physical properties of SnO₂ materials: 1. Preparation and defect structure", *J. Electrochem. Soc.*, 123(7):199-205 (1976).
23. Maudes, J. S., Rodriguez, T., "Sprayed SnO₂ films: Growth mechanism and film structure characterization", *Thin Solid Films*, 69(2):183-189 (1980).
24. Feil, W.A., Wessels, B.W., "Defect structure of strontium titanate thin films", *J. Appl. Phys.*, 74 (6): 3927-3931 (1993).
25. Sing, A., Reinhard, K. C., Anderson, W. A., "Temperature dependence of the electrical characteristics of Yb/p-InP tunnel metal-Insulator-Semiconductor Junctions". *J. Appl. Phys.*, 68(7): 3475-3479 (1990).

26. Neamen, D. A., "Semiconductor Physics and Devices 2nd ed.", *Mc Graw-Hill*, New York, 420-450, 517-523 (1997).
27. Cooke, M. J., "Semiconductor Devices", *Prentice Hall*, New York, 294-308 (1990).
28. Ghandhi, S. K., "VLSI Fabrication Principles", *John Wiley & Sons*, New York, 401-405 (1983).
29. Gökçen, M., "MOS Yapılarda kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/ω-V) Karakteristiklerinin Frekans ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 13-15, 37 (2005).
30. Goetzberger, A., Klausmann, E., Schulz. M. J., "Interface states on semiconductor/insulator surfaces", *CRC Critical Reviews in Solid State Sciences*, 6(1):226-233 (1976).
31. Schroder, D. K., "Semiconductor Material and Device Characterization 2nd ed.", *John Wiley & Sons*, New York, 337-379 (1998).
32. Altındal, Ş., "Al-SiO_x-pSi aygıtların ve güneş pillerinin elektriksel karakteristikleri", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 52-74 (1993).
33. Ulrich, B., Kuchar, F., "Capacitance-voltage measurements on a p-type InSb metal/insulator/semiconductor structure with Si₃N₄ as the insulator", *Thin Solid Films*, 168(2):157-168 (1989).
34. Haddara, S. H., El-Sayed, M., "Conductance technique in MOSFETs: study of interface trap properties in the depletion and weak inversion regimes", *Solid-State Electronics*, 31(8):1289-1298 (1988).
35. Lain, X.C., "Study of ferroelectric device integration", M. Sc. Thesis, *National Sun Yat-Sen University Department of Physics*, China, 5-9, 20-23 (2002)
36. Chen, L.F., Ong, C.K., Neo, C.P., Varadan, V.V., Varadan V.K., "Measurement and Materials Characterization", 1st ed., Microwave Electronics, *John Willey & Sons*, 19 (2004).
37. Tarui, Y., Hirai, I.T., Teramoto, K., Koike, H, Nagashima, K., "Application of the ferroelectric materials to ULSI memories", *Applied Surface Science*, 113/14:656-663 (1997).
38. Moll, J.L., Tarui, Y., "A new solid state memory resistor", *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-10, 338-341 (1963).

39. Sugibuchi, K., Kurogi, Y., Endo, N., “Ferroelectric field effect memory device using Bi₄Ti₃O₁₂ film”, *J. Appl. Phys.*, 46:2877–2881 (1975).
40. Bae, J.C., Kim, S.S., Kim, W.J., Choi, E.K., Son, T.K., “ Ferroelectric lanthanum-substituted Bi₄Ti₃O₁₂ thin films fabricated on p-type Si(100) substrates by a sol-gel method”, *Thin Solid Films*, 468:23-27 (2004).
41. Lee, H.N., Lim, M., Kim, Y.T., Kalkur, T.S., Choh, S.H., “Characteristics of Metal/Ferroelectric/Insulator/Semiconductor Field Effect Transistors using a Pt/SrBi₂Ta₂O₉/Y₂O₃/Si Structure,” *Japan. J. of Appl. Phys.*, 1(37):1107-1109 (1998).
42. Huang, C. H., Tseng, T. Y., Chien, C. H., Yang, M. J., Leu, C. C., Chang, T. C., Liu, P. T., Huang, T. Y., “Electrical properties of metal-ferroelectric-insulator semiconductor using sol-gel derived SrBi₂Ta₂O₉ film and ultra-thin Si₃N₄ buffer layer”, *Thin Solid Film*, 420-421:377 (2002).
43. Choi, K. J., Shin, W. C., Yang, J. H., Yoon, S.G., “Metal/ferroelectric/insulator/semiconductor structure of Pt ”, *Appl. Phys. Lett.*, 75:722-724 (1999).
44. Huang, C.H., Wang, Y.K., Lue, H.T., Huang, J.Y., Lee, M.Z., Tseng, T.Y., “Memory properties of metal/ferroelectric/insulator/semiconductor structures using rf sputtered ferroelectric Sr_{0.8}Bi_{2.5}Ta_{1.2}Nb_{0.8}O₉ thin films”, *J. Euro. Ceram. Soc.*, 24 (8):2471-2476 (2004).
45. Korucu, D. “InP Yarıiletkenlerinde I-V, C-V ve DLTS Çalışmaları”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2009).
46. Özdemir, S. and Altındal Ş., “Temperature dependent electrical Characteristics of Al-SiO_x-p-Si solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 32:115-127 (1994).
47. Card, H.C., Rhoderick, E.H., “Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes”, *J.Phys.D: Appl. Phys.*, 4:1589-1601 (1971).
48. Singh, A., “Characterisation of Interface States at Ni/nCdF₂ Schottky Barrier Type Diodes and the Effect of CdF₂ Surface Preparation”, *Solid State Electron.*, 28 (3):223-232 (1985).
49. Yildiz, E., Altındal, Ş., Kanbur, H., “Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes”, *J. Appl. Phys.*, 103, 124502:1-7 (2008).
50. Ahmad, Z., Sayyad, M.H., “Extraction of electronic parameters of Schottky diode based on an organic semiconductor methyl-red”, *Physica E.*, 41: 631–634 (2009)

51. Vural, Ö., Şafak, Y., Altındal, Ş., Türüt, A., “Current–voltage characteristics of Al/Rhodamine-101/n-GaAs structures in the wide temperature range”, *Current Applied Physics*, baskıda (2009).
52. Kar, S., Dahlke, W. E., “Interface states in MOS structures with 20-40 Å thick SiO₂ films on nondegenerate Si”, *Solid-State Electronics*, 15:221-237 (1972).
53. Taşçıoğlu İ., Tataroğlu A., Özbay A., Altındal Ş., “The role of ⁶⁰Co γ-ray irradiation on the interface states and series resistance in MIS structures”, *Radiation Physics and Chemistry*, baskıda, (2009).
54. Altındal, Ş., Karadeniz, S., Tuğluoğlu N., and Tataroğlu, A., “The role of interface states and series resistance on the I-V and C-V characteristics in Al/SnO₂ p-Si Schottky diodes”, *Solid State Electron.*, 47(10):1847-1854 (2003).
55. Kanbur, H., Altındal, Ş., Tataroğlu, A., “The effect of states, excess capacitance and series resistance in the Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes”, *Appl. Surface Sci.* 252:1732-1736 (2005).
56. Cheung, S. K., Cheung, N. W., “Extraction of schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics”, *Appl. Phys. Lett.*, 49(2):85-87 (1986).
57. Werner, J. H., Güttler H. H., “Temperature dependent of Schottky barrier heights on silicon”, *J. Appl. Phys.*, 73 (3):1315-1318 (1993).
58. Rhoderick, E. H., Williams, R. H., “Metal Semiconductor Contacts”, *Oxford Press*, 257-264 (1988).
59. Bengi, S. “Au/PVA/n-Si (MIS) Schottky Diyotların Temel Elektriksel Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2008).
60. Coleman, Hill, W. A, Coleman, C. C., “A single-frequency approximation for interface-state density determination”, *Solid State Electronics*, 23:987-993 (1980).
61. Lang, D.V., “Deep-Level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors”, *J. Appl. Physics*, 45 (7):3023-3032 (1974).
62. Wang, Y.P., “Degradation phenomena of multilayer ZnO-glass varistors studied by deep level transient spectroscopy”, *Appl. Phys. Lett.*, 69 (12):1807-1809 (1996).
63. Wang, Y.P., Tseng, T.Y., “Electronic defect and trap-related current of (Ba_{0,4}Sr_{0,6})TiO₃ thin films”, *J. Appl. Physics*, 81 (10):6762-6766 (1997).

64. Baude, P.F., Ye, C., Polla, D.L., “Deep level transient spectroscopy characterization of ferroelectric Pb(Zr,Ti)O₃ thin films” *Appl. Phys. Lett.*, 64 (20):2670-2672 (1994).
65. Moo-Chin Wanga,*, Fu-Yuan Hsiaob, Nan-Chun Wub, “Characterization and Leakage Current density of Radio Frequency magnetron Nonocrstalline SrTiO₃ Thin Films”. *Journal of Crystal Growth* 264 (2004) 271-277.
66. Aydemir, U. “Au/SrTiO₃/n-Si (MFS) Schottky Diyotların Elektriksel Parametrelerinin I-V, C-V ve DLTS Metodu İle İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2009).
67. Özmenteş, R. “ Schottky Diyotların Karakteristik Parametrelerinin Belirlenmesinde Frekans optimizasyonu” Yüksek Lisans Tezi, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Van, (2006).
68. Dündar Durak, T. “Ag/GaAs Schottky Yapıların I-V ve C-V Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, (2007).
69. Parlaktürk, F. “Au/Bi₄Ti₁₃O₁₂/SiO₂/n-Si (MFIS)Yapılarının Hazırlanması , Elektriksel ve Dielektrik Özelliklerinin ve Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2007).
70. Tataroğlu, F. “MIS Yapıların Frekans ve Radyasyona Bağlı Temel Elektriksel Parametreleri ”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2006).
71. Yücedağ, İ. “Metal- Yalıtkan- Yarıiletken(MIS) Yapılarda Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklık ve Frekansa Bağlı İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2007).
72. Çelik, G. “SrTiO₃ ve SrZrO₃ Kristallerinin Elektronik Band Yapısı ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, (2010).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DEMİR, Mutlu
Uyruğu : T.C
Medeni hali : Bekâr
Doğum tarihi ve yeri : 12.05.1984 - GÜMÜŞHANE
Telefon : 0535 623 49 79
e-mail : mutludmr@hotmail.com / mutlu.demir@tuv-sud.com.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi	2013
Lisans	18 Mart Üniversitesi/ Fizik Bölümü	2007
Lise	Sincan Süleyman Demirel Anadolu Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-2010	Gate Elektronik	Ar-Ge Personeli
2010-2011	Tek – Servis	Servis ve Satış Sorumlusu
2011-2013	Tuv SÜD Türkiye	Endüstriyel Enspektör

Yabancı Dil

İngilizce, Rusça

Hobiler

Spor yapmak, TV izlemek, Kitap Okumak