

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Al/Al₂O₃/CdS MIS YAPISININ YAPISAL VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

MUZAFFER MOĞULKOÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. MERİH SERİN**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Al/Al₂O₃/CdS MIS YAPISININ YAPISAL VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Muzaffer MOĞULKOÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 11.01.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Merih SERİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Öğr. Gör. Dr. Murat ÇALIŞKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Merih SERİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Dolunay ŞAKAR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Saffettin YILDIRIM
İstanbul Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2011-01-01-YULAP06 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Tez süreci boyunca maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen, deneysel çalışmalarında yardımcı olan bilgi ve birikimiyle bana yol gösteren sevgili hocam Doç. Dr. Merih SERİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinin başlangıcından itibaren deneysel sonuçların yorumlanmasında ve tezin hazırlanmasını desteğini eksik etmeyen, çalışmalar boyunca bilgi ve birikimlerinden faydalandığım sevgili hocam Öğr. Gör. Dr. Murat ÇALIŞKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar boyunca laboratuvar imkanlarını açarak çalışmalarına destek veren, fikirlerinden yararlandığım İstanbul Üniversitesi'nden Yrd. Doç. Dr. Saffettin YILDIRIM'a teşekkürlerimi sunarım.

Doğduğum günden beri yanımda olan ve benden desteklerini esirgemeyen başta annem Fatma MOĞULKOÇ, babam Mustafa Asım MOĞULKOÇ, ablalarım Sezen MOĞULKOÇ ve Figen MOĞULKOÇ olmak üzere tüm aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, fikirlerinden yararlandığım laboratuvar çalışma arkadaşım Furkan KURUOĞLU'na, tüm Katıhal Elektronik ve Organik Elektronik laboratuvarı çalışanları ile desteklerinden dolayı tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ocak, 2013

Muzaffer MOĞULKOÇ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv

BÖLÜM 1

GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	3

BÖLÜM 2

2.1 Giriş	4
2.2 Teorik Bilgiler	5
2.2.1 Yarıiletkenlerde Band Oluşumu ve İletkenlik	5
2.2.2 Metal – Yarıiletken Eklemler	8
2.2.3 Metal – Yalıtkan – Yarıiletken (MIS) Eklemler	10
2.2.3.1 İdeal MIS Yapısı	11
2.2.3.2 Gerçek MIS Yapısı	13
2.2.4 Omik Kontaklar	14
2.2.5 İletkenlik Mekanizmaları	15
2.2.5.1 Termiyonik Emisyon Teorisi	15
2.2.5.2 Difüzyon Teorisi	17
2.2.5.3 Poole-Frenkel Mekanizması	18
2.2.5.4 Schottky-Richardson Emisyonu	20
2.2.6 CdS’ in Kristal yapısı ve Parametreleri	21

2.2.6	Al_2O_3 'ün Elektrokimyası	24
BÖLÜM 3		
ÜRETİM YÖNTEMLERİ		26
3.1	Elektron Demeti	26
3.2	Sprey Buharlaştırma	27
3.3	Anodik Oksidasyon.....	28
BÖLÜM 4		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....		30
4.1	Al_2O_3 Tabakasının Oluşturulması.....	30
4.1.1	Al_2O_3 Tabakasının Anodik Oksidasyon Yöntemiyle Oluşturulması	30
4.2	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CdS}$ Eklemine Oluşturulması.....	31
4.3	CdS Filmlerin İletkenlik, Öz direnç ve Taşıyıcı Yoğunluğu Ölçümleri....	32
4.4	Optik Ölçümler	34
4.5	I-V Karakteristiklerinin Ölçümü ve Parametrelerin Belirlenmesi	35
4.6	C-V Karakteristiklerinin Ölçümü ve Parametrelerin Belirlenmesi.....	37
BÖLÜM 5		
BULGULAR.....		38
5.1	CdS Filmlerin Optik Özellikleri	38
5.2	CdS Filmlerin Yapısal Özellikleri	39
5.3	Elektriksel Özellikler	40
5.3.1	I-V Ölçümlerinden Elde Edilen Sonuçlar.....	40
5.3.2	C-V Ölçümlerinden Elde Edilen Sonuçlar	45
5.3.3	C-f Ölçümleri.....	48
5.3.4	Arayüzey Durum Yoğunluğu	49
5.3.5	Sensör Uygulamaları	53
SONUÇ VE ÖNERİLER.....		56
KAYNAKLAR.....		59

SİMGE LİSTESİ

μ	Mobilite
A^*	Richarson Sabiti
C	Kapasite
d	Film Kalınlığı
E_g	Yasak Enerji Aralığı
E_{ss}	Arayüzey Durumlarının Enerjisi
H	Planck Sabiti
K	Boltzman Sabiti
m^*	Etkin Kütle
n	Elektron Konsantrasyonu
$N(E)$	Durum Yoğunluğu
N_A	Donor Konsantrasyonu
N_{ss}	Arayüzey Durum Yoğunluğu
Q_{it}	Arayüzey Yük Yoğunluğu
Q_M	Metal Yüzey Yükü
Q_{sc}	Uzay Yükü
$q\chi$	Elektron Alınganlığı
T	Geçirgenlik, Sıcaklık
V	Frekans
W	Arınma Bölgesinin Genişliği
α	Soğurma Katsayısı
β_{SR}	Schottky-Richarson Sabiti
ϵ_i	Yalıtkanın Dielektrik Sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin Dielektrik Sabiti
λ	Dalgaboyu
σ	Hacimsel İletkenlik
ϕ_m	Metal İş Fonksiyonu
ϕ_n	Fermi Seviyesi İle İletim Bandı Arasındaki Enerji Farkı
φ_s	Yüzey Potansiyeli

KISALTMA LİSTESİ

CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
MS	Metal-Yarıiletken
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
SB	Sprey Buharlaştırma
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TE	Termiyonik Emisyon
XRD	X-Ray Diffraction

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1	İdealite faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi 1
Şekil 2	Al_2O_3 'ün kapasitans-frekans grafiği 2
Şekil 3	Diyodun arayüzey durum yoğunluğunun enerjiye bağlı dağılım grafiği 3
Şekil 4	Enerji band diyagramı 6
Şekil 5	Yarıiletken (a) Rekombinasyon (b) Jenerasyon 6
Şekil 6	Direkt ve dolaylı band yapısı 7
Şekil 7	Metal-yarıiletken kontağın enerji diyagramı (a) metal ve yarıiletkenin vakum seviyesine göre enerji seviyeleri, (b)metal-yarıiletken eklem oluştuktan sonra enerji seviyeleri, δ aralığı (c) azaldığında ve (d) sıfırlandığında. 9
Şekil 8	Metal n-tipi yarıiletken eklem enerji band diyagramı a) denge durumu b)ters yönde c) ileri yönde gerilim uygulandığında 10
Şekil 9	MIS Yapısı 11
Şekil 10	İdeal MIS yapısının enerji-bant diyagramı. 12
Şekil 11	MIS yapısında tuzaklanmalardan kaynaklı histerezis kayması 14
Şekil 12	Metal-n-tipi yarıiletken $\phi_m < \phi_s$ için durumunda, a) temas öncesi band diyagramı, b) temas sonrası band diyagramı 15
Şekil 13	a) Coloumbik potansiyel kuyusu b)Elektrik alan uygulandığında potansiyel kuyusundaki Poole-Frenkel etkisi..... 19
Şekil 14	Bariyer yüksekliğinin elektrik alan ile değişimi 20
Şekil 15	CdS bileşiğinin hekzagonal wurtzite kristal yapısı 21
Şekil 16	CdS filmlerin direncinin tavlama sıcaklığına bağlılığı 22
Şekil 17	Elektron demeti ile fiziksel buharlaştırma sistemi 27
Şekil 18	Sprey Buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi 28
Şekil 19	Anodik Oksidasyon yönteminin şematik gösterimi 29
Şekil 20	$\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CdS}$ yapısı 32
Şekil 21	Van der Pauw yöntemi ile kontakların yerleşimi 33
Şekil 22	Van der Pauw yönteminde düzeltme fonksiyonunun grafiği 33
Şekil 23	Dikdörtgen formlu örneğin ve kontaklarının gösterimi 34
Şekil 24	Akım Gerilim Ölçümleri için Kullanılan Deney Seti 35
Şekil 25	CdS filmin optik geçirgenlik spektrumu 38
Şekil 26	Optik geçirgenlik sonucu elde edilen $(\alpha h\nu)^2$ değerinin enerjiye bağlı değişimi 39
Şekil 27	CdS filmin XRD analizi 39
Şekil 28	60 mikron kalınlıklı $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CdS}$ yapısının sıcaklığa bağlı J-V grafiği.... 41
Şekil 29	65 mikron kalınlıklı $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CdS}$ yapısının sıcaklığa bağlı J-V grafiği.... 41

Şekil 30	60 mikron kalınlıklı Al/Al ₂ O ₃ /CdS yapısının dV/dln(J) ve H(J)-J grafiği...	42
Şekil 31	65 mikron kalınlıklı Al/Al ₂ O ₃ /CdS yapısının dV/dln(J) ve H(J)-J grafiği...	42
Şekil 32	60 mikron kalınlık için Al/Al ₂ O ₃ /CdS MIS diyotun pozitif beslem bölgesinde ln(I) - V grafiği	44
Şekil 33	65 mikron kalınlık için Al/Al ₂ O ₃ /CdS MIS diyotun pozitif beslem bölgesinde ln(I) - V grafiği	44
Şekil 34	Al/Al ₂ O ₃ /CdS yapısının 23 kHz'de C-V grafiği.....	45
Şekil 35	60 mikron kalınlık için Al/Al ₂ O ₃ /CdS yapısının 23 kHz'de sıcaklığa bağlı C-V grafiği	46
Şekil 36	60 mikron kalınlık için Al/Al ₂ O ₃ /CdS MIS diyotun C-V karakteristiğinin frekans ile değişimi	46
Şekil 37	60 mikron kalınlık için Al/Al ₂ O ₃ /CdS diyotun C-V karakteristiğinden elde edilen 1/C ₂ -V grafiği.....	47
Şekil 38	Al ₂ O ₃ 'ün C-f karakteristiği	48
Şekil 39	60 mikron kalınlık için Al/Al ₂ O ₃ /CdS MIS diyotun 30 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi	49
Şekil 40	60 mikron kalınlık için Al/Al ₂ O ₃ /CdS MIS diyotun 40 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi	49
Şekil 41	60 mikron kalınlık için Al/Al ₂ O ₃ /CdS MIS diyotun 50 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi	50
Şekil 42	60 mikron kalınlık için Al/Al ₂ O ₃ /CdS MIS diyotun 60 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi	50
Şekil 43	65 mikron kalınlık için Al/Al ₂ O ₃ /CdS MIS diyotun 30 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi	51
Şekil 44	65 mikron kalınlık için Al/Al ₂ O ₃ /CdS MIS diyotun 40 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi	51
Şekil 45	65 mikron kalınlık için Al/Al ₂ O ₃ /CdS MIS diyotun 50 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi	52
Şekil 46	65 mikron kalınlık için Al/Al ₂ O ₃ /CdS MIS diyotun 60 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi	52
Şekil 47	60 mikron kalınlıklı oksit tabakaya sahip Al/Al ₂ O ₃ /CdS MIS diyotun neme bağlı I-V karakteristiği	53
Şekil 48	65 mikron kalınlıklı oksit tabakaya sahip Al/Al ₂ O ₃ /CdS MIS diyotun neme bağlı I-V karakteristiği	54
Şekil 49	CdS filmin yan kesit SEM görüntüsü	56
Şekil 50	Al ₂ O ₃ tabakasının yan kesit SEM görüntüsü	57

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1	CdS'in özellikleri.....23
Çizelge 2	Al ₂ O ₃ 'ün özellikleri.....25
Çizelge 3	60 mikron kalınlıklı Al/Al ₂ O ₃ /CdS yapısının parametreleri.....43
Çizelge 4	65 mikron kalınlıklı Al/Al ₂ O ₃ /CdS yapısının parametreleri.....43
Çizelge 5	Sıcaklığa ve kalınlığa bağlı doyma akımları.....45
Çizelge 6	Al/Al ₂ O ₃ /CdS diyotlar ile hesaplanan taşıyıcı yoğunluğu değerleri.....48
Çizelge 7	60 mikron kalınlıklı oksit tabakaya sahip MIS diyotun parametlerinin ortam şartlarına bağlı değişimi.....55
Çizelge 8	65 mikron kalınlıklı oksit tabakaya sahip MIS diyotun parametlerinin ortam şartlarına bağlı değişimi.....55

ÖZET

Al/Al₂O₃/CdS MIS YAPISININ YAPISAL VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Muzaffer MOĞULKOÇ

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Merih SERİN

Eş Danışman: Öğr. Gör. Dr. Murat ÇALIŞKAN

Bu çalışmada, farklı oksit kalınlıkları ile oluşturulan Al/Al₂O₃/CdS MIS Schottky diyotların akım-gerilim (I-V) ve kapasitans-gerilim (C-V) karakteristikleri $\pm 5V$ aralığında incelendi. Elde edilen ölçümler ile yapının idealite faktörü (n), bariyer yüksekliği (ϕ_B), seri direnci (R_s), taşıyıcı yoğunluğu (N_A) ve arayüzey durumlarının sayısı (N_{ss}) belirlendi. Sıcaklık artışı ile birlikte ϕ_B ve R_s değerlerinde düşüş, n değerinde artış gözlemlenirken N_A ve N_{ss} değerlerinde incelenen sıcaklık aralığında belirgin bir değişim görülmedi. Diyotun nem algılama özelliğinin incelenmesi için nem ortamında I-V ölçümleri yapıldı. Bu ölçümler sonucunda nem etkisi ile diyotun direncinde azalma meydana geldiği görüldü. Bu nedenle diyotun sensör uygulamaları için uygun bir davranış gösterdiği anlaşıldı.

Anahtar Kelimeler: CdS, metal-yalıtkan-yarıiletken, MIS, Schottky eklem, diyot, arayüzey durum yoğunluğu, Al₂O₃, Anodik Oksidasyon, sensör

ABSTRACT

ELECTRICAL AND STRUCTURAL INVESTIGATION OF Al/Al₂O₃/CdS MIS STRUCTURE

Muzaffer MOGULKOÇ

Department of Physics

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Merih SERİN

Co-Advisor: Lecturer. Dr. Murat CALISKAN

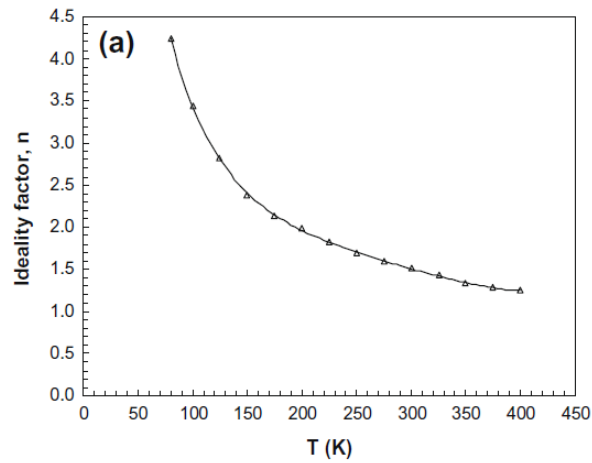
In this study, current-voltage (I-V) and capacitance-voltage (C-V) characteristics of Al/Al₂O₃/CdS MIS Schottky diodes prepared with different oxide thickness have been investigated over voltage range of $\pm 5V$. From the evaluation of the experimental measurements, ideality factor (n), barrier height (ϕ_B), series resistance (R_s), carrier density (N_A) and interfacial state density (N_{ss}) were calculated. When R_s and ϕ_B values decrease with increasing temperature, the n increases with increasing temperature and significant changes were not observed in the examined temperature range for N_{ss} and N_A . Examination of humidity sensing property of diode, I-V measurements were done in humidity atmosphere. The resistance of diode decreased with the effect of humidity. Therefore, it was understood that the diode was suitable for the sensor applications.

Key words: CdS, metal-insulator-semiconductor, MIS, Schottky junction, diode, interface state density, Al₂O₃, Anodizing, sensor

1.1 Literatür Özeti

Metal-yalıtkan ve metal-yalıtkan-yarıiletken aygıtlar son yıllarda teknolojinin ilgisini çekmiş ve halen üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Metal ve yarıiletken arasındaki arayüzey kalitesi Schottky diyodun performansını ve kalitesini belirlemekte ve diyodun elektriksel özelliklerini doğrudan etkilemektedir [1] [2].

H. Altuntaş, Ş. Altındal, H. Shtrikman ve S. Özçelik Au/SiO₂/n-GaAs (MIS) Schottky diyotun idealite faktörünü ve bariyer yüksekliğini belirlemek için yaptıkları çalışmada MIS diyotun 80–400K arasındaki sıcaklık değerlerinde ölçülen akım-gerilim karakteristiklerinden faydalanmışlardır.

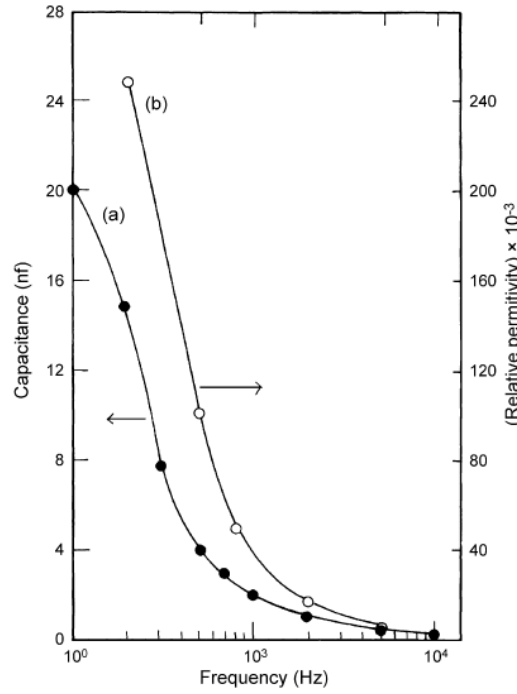


Şekil 1 idealite faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi

Sıcaklığın artmasıyla idealite faktörünün azaldığını, bariyer yüksekliğinin ise arttığını ortaya koymuşlardır. Ayrıca idealite faktörü ve bariyer yüksekliğinin sıcaklığa yüksek

duyarlılık gösterdiğinden dolayı termiyonik emisyon mekanizmasına uyduğu belirtilmiştir [3].

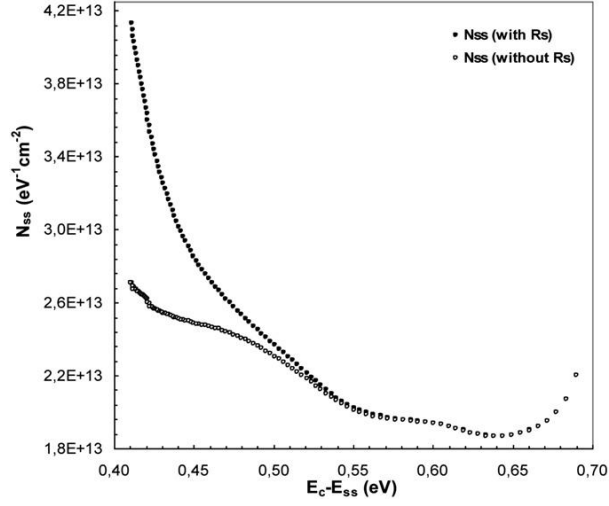
K.S. Shamala, L.C.S. Murthy, M.C. Radhakrishna, K. Narasimha Rao yaptıkları çalışmada spray pyrolysis yöntemi ile hazırlanmış Al_2O_3 'ün kapasitans-frekans ölçümleri ile nem sensörü uygulamasını gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 2 Al_2O_3 'ün kapasitans-frekans grafiği

Neme bağlı kapasitans-frekans ölçümleri sonucunda 0 ile %90 arasında değiştirilen bağıl nem değerleriyle kapasitansın 0.537nf değerinden 2.073nf değerine ulaştığını, %20 ile %87 arasında değiştirilen bağıl nem değerleriyle direncin 153k Ω 'dan 93k Ω 'a düştüğünü belirtmişlerdir [4].

S. Demirezen, Z. Sönmez, U. Aydemir ve S. Altındal Au / PVA (Bi-katkılı) / n-Si yaptıkları çalışmada Schottky diyodun arayüzey durumlarını ve yalıtkan tabakanın arayüzey durumlarının enerji dağılımına etkisini gözlemlemek için, oda sıcaklığında, diyodun akım-gerilim karakteristiğinden faydalanmışlardır.



Şekil 3 Diyodun arayüzey durum yoğunluğunun enerjiye bağlı dağılım grafiği

Diyodun akım gerilim karakteristiklerini kullanarak, Cheung fonksiyonları yardımıyla, yapının seri direnci hesaplanmış ve bulunan değerin arayüzey durum yoğunluğu dağılımında önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir [2].

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada alüminyum üzerine anodik oksidasyon metoduyla oluşturulan Al_2O_3 yalıtkan tabakası üzerine, spreylü buharlaştırma yöntemiyle CdS kaplanarak elde edilen MIS diyotun karakteristik parametrelerinin belirlenmesi ve uygulama alanlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Anodik oksidasyon metoduyla oluşturulan oksit tabakanın üzerine, spreylü buharlaştırma yöntemiyle CdS kaplanarak oluşturulan, MIS diyotun karakteristik parametreleri sıcaklık ve neme bağlı olarak incelendi. Bu sayede diyotun sensör olarak kullanılmasını sağlayan parametreler belirlendi.

BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

2.1 Giriş

Schottky diyotlar günümüz teknolojisinde önemli bir yer tutmaktadır. Metallerin ve yarıiletkenlerin bant yapıları, taşıyıcı mobiliteleri gibi birçok fiziksel özellik metal-yarıiletken kontak yardımıyla incelenebilir. Günümüz teknolojisinde önemli bir yere sahip olan Schottky kontaklardan hızlı anahtar uygulamaları, metal-yarıiletken (MS), metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS), metal-oksit-yarıiletken (MOS), metal-yarıiletken güneş pilleri, mikrodalga karıştırıcı dedektörler, varaktörler (kapasiteleri uygulanan gerilime göre değişen kondansatörler), Schottky engel tabakalı alan etkili transistörler (MESFET), metal-oksit-yarıiletken alan etkili transistörler (MOSFET) ve son yıllarda polimerik ve nonpolimerik organik bileşiklerle yapılan kontaklar Schottky diyotların ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Metal-yarıiletken arayüzeyinde bir bariyer oluştuğunu ilk kez Schottky ortaya koyduğu için metal-yarıiletken kontaklar Schottky kontak olarak adlandırılırlar. Metal-yarıiletken kontaklarla ilgili ilk çalışma 1874 yılında Braun tarafından yapılmıştır [5]. 1920’lerde ilk bakır oksit doğrultucu plaka üretilmiştir.

1938’de Walter Schottky ve Neville F. Mott birbirlerinden habersiz olarak akım difüzyon teorisini geliştirmişlerdir. Termiyonik emisyon teorisi de 1942 yılında Hans Bethe tarafından geliştirilmiştir [6]. 1945’te mikrodalga radarların geliştirilmesi sağlanmıştır [7]. Crowell ve Sze, 1965’de, difüzyon ve termiyonik emisyon teorilerini birleştirerek “Termiyonik-emisyon-difüzyon” teorisini ileri sürmüşlerdir.

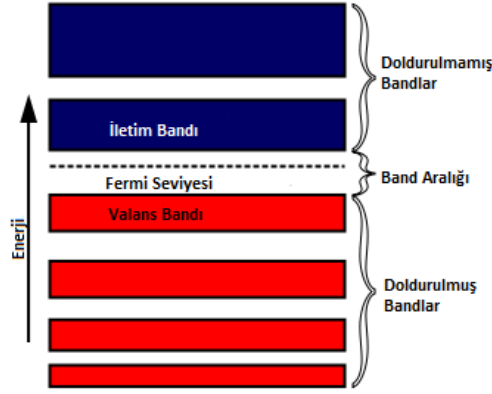
Metal-yarıiletken Schottky diyotlarda metal ile yarıiletkenin arasına konulan arayüzey tabakasının, MS kontakların elektriksel ve fiziksel parametlerine etkisi anlaşıldıktan sonra, farklı arayüzey tabakaları eklenerek, metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılarla ilgili çalışmalar başladı. Metal-yalıtkan-yarıiletken eklemler ilk kez varaktör olarak 1959’ da Pfann ve Garrett tarafından önerildi. Bu önerilen MIS eklemin analizi ise Frankl ve Lindner tarafından yapıldı [8]. İlk başarılı MIS diyot ise 1960 yılında Si üzerine termal olarak büyütülen SiO₂ ile Ligenza ve Spitzer tarafından üretildi. Gün geçtikçe MIS yapıların kullanım alanlarının artmasından dolayı bu yapılar üzerine olan çalışmalar artmıştır. Arayüzey davranışı ve akım-iletim mekanizmalarını anlayabilmek için bir çok yöntem geliştirilmektedir.

2.2 Teorik Bilgiler

2.2.1 Yarıiletkenlerde Band Oluşumu ve İletkenlik

İletken, yalıtkan ve yarıiletken olmak üzere üç gruba ayrılan katı cisimlerden öz direnci (ρ) $10^{-4} - 10^{10}$ ohm.cm aralığında olanlar yarıiletken olarak adlandırılır. Yarıiletkenlerde kendi içinde, yapısındaki kusur atomlarının oranına göre, özden ve katkılı olmak üzere ikiye ayrılır. Özden yarıiletkenlerde, mutlak sıfırda, serbest yük taşıyıcıları bulunmamaktadır. Yani, valans bandı elektronlarla tam olarak doludur, iletim bandında ise serbest elektron bulunmamaktadır, tamamen boştur. Sıcaklığın artmasıyla serbest elektron sayısı ve aynı miktarda delik konsantrasyonu da artmaktadır.

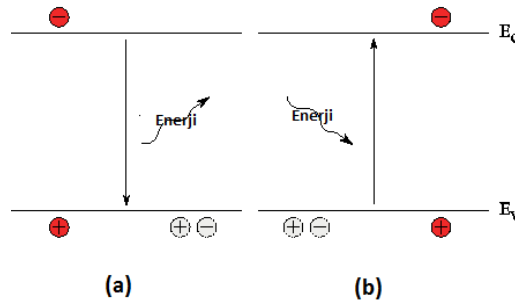
Katı cisimler birbirleriyle etkileşen çok sayılı atomlardan oluşmaktadır. Kristal oluşturulduğunda, çok sayılı atomları birbirine yaklaştırırken atomların ayırık enerji düzeyleri yerine enerji bandları meydana gelmektedir. Her enerji bandı uygun atomların enerji düzeyinden oluşmaktadır.



Şekil 4 Enerji band diyagramı

Şekil 4'te yarıiletken için enerji band diyagramı gösterilmektedir. Enerji arttıkça enerji bandlarının genişliği artar, yasak band genişliği ise azalır. Yarıiletkende en üst seviyedeki banda iletim bandı, onun altındaki banda ise valans bandı denir. Mutlak sıfırda valans bandı elektronlarla tam doludur. İletim bandı ise boş ya da kısmen doludur. Yalıtkanların ve yarıiletkenlerin iletim bandı mutlak sıfırda boş iken metallerin iletim bandı ise elektronlarla kısmen doludur (yarı dolu bant). Fermi seviyesi ise 0 K' de elektronlar tarafından doldurulmuş olan son enerji seviyesini gösterir.

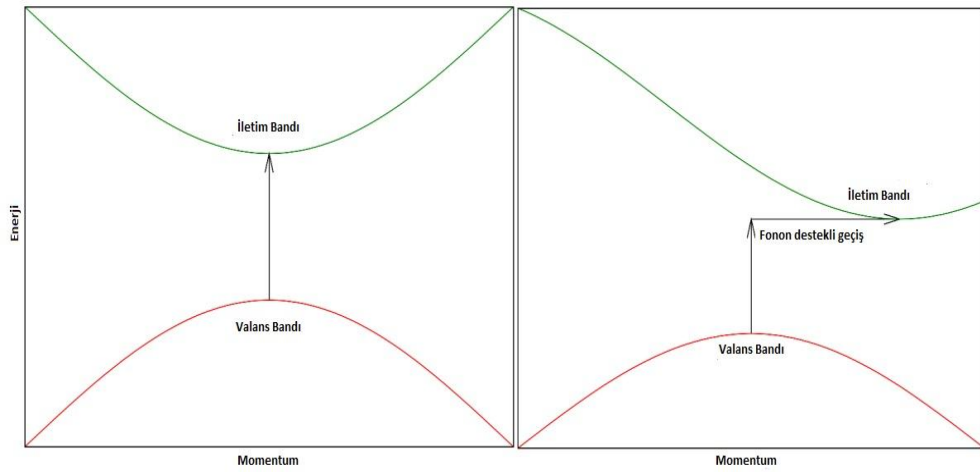
Sıcaklık arttıkça, yani mutlak sıfırdan daha yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça, elektron valans bandından iletim bandına geçer ve bu sayede elektron-delik çiftleri oluşur (jenerasyon). Bu olayın sonucunda, iletim bandında serbest elektron, valans bandında ise delik meydana gelir. Yarıiletkende bu olayın tam tersini de gözlemek mümkündür. Elektronun iletim bandından valans bandındaki deliğe geçişi elektron-delik çiftinin yeniden birleşmesine (rekombinasyon) neden olmaktadır.



Şekil 5 Yarıiletkende (a) Rekombinasyon (b) Jenerasyon

Yarıiletkenlerde, elektron veren katkı atomu donör veya verici olarak adlandırılır. İletkenliği donör katkısıyla olan yarıiletken n-tipi yarıiletken denir. n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar ve azınlık yük taşıyıcıları deliklerdir. Elektronları alan katkı atomları ise akseptör veya alıcı olarak adlandırılır. İletkenliği akseptör tipli katkı ile belirlenen yarıiletken, p-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. p-tipi yarıiletkende, çoğunluk yük taşıyıcıları deliklerdir ve azınlık yük taşıyıcıları elektronlardır.

Yarıiletkenler, valans bandından iletim bandına elektron geçiş durumlarına göre doğrudan ve dolaylı olmak üzere ikiye ayrılır. Doğrudan band yapısına sahip yarıiletkenlerde enerji-momentum uzayında valans bandının en üst noktası ile iletim bandının en alt noktası aynı momentum değerine sahiptir. Dolaylı band yapısına sahip yarıiletkende ise elektron iletim bandı ve valans bandı arasında bir noktaya geçiş momentum değerinin değişmesi sonucu iletim bandına katılır [9] [10].



Şekil 6 Direkt ve dolaylı band yapısı

Yarıiletkenlerde, hem elektronlar hem de delikler iletme katkı sağlamaktadır. Bir özden yarıiletkenin σ , hacimsel iletkenliği şu şekilde ifade edilir;

$$\sigma = ne\mu_e + pe\mu_h \quad (2.1.)$$

Burada, n ve μ_e sırasıyla elektron konsantrasyonu ve mobilitesidir. Benzer olarak, p ve μ_h delik konsantrasyonu ve mobilitesidir. Yarıiletkendeki n ve p konsantrasyonu;

$$n = p = \text{sabit} * T^{3/2} e^{-E_g/2kT} \quad (2.2.)$$

Eşitliğiyle verilmektedir. Denklem (2.1.) ve (2.2.) kullanılarak hacimsel iletkenlik;

$$\sigma = \text{sabit} * e(\mu_e + \mu_h) T^{\frac{3}{2}} e^{-E_g/2kT} = \sigma_0 e^{-E_g/2kT} \quad (2.3.)$$

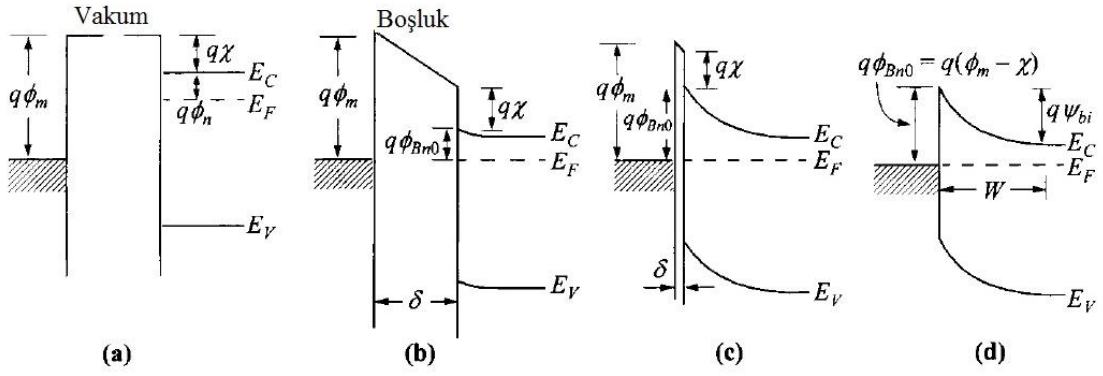
olarak bulunur. Yarıiletkenin E_g yasak enerji aralığı değeri $\ln(\sigma) - 1/T$ grafiğinin eğiminden hesaplanabilir [11].

Yarıiletkenlerin bir çoğunda iletkenlik, oda sıcaklığında katkı atomlarının etkisiyle değişir. İletkenliği katkılarla belirlenen yarıiletkenlere katkılı yarıiletken denir. Donör veya akseptör katkı atomlarının eklenmesi yarıiletkendeki elektron ve delik dağılımını değiştirmektedir [10]

2.2.2 Metal – Yarıiletken Eklemler

Mikroelektronik aygıtların çoğunluğunun çalışma prensipleri metal-yarıiletken kontakların fiziksel karakteristiklerine bağlıdır. Bu tür kontakların sınır bölgesinde potansiyel engeller meydana gelir. Potansiyel engellerin oluşması, metal-yarıiletken arası yük taşıyıcıların konsantrasyonlarının yeniden dağılmasına bağlıdır. Kontakların akım ve kapasite değerleri, dışarıdan uygulanan gerilimin değeri ve yönü ile değişir. Yarıiletken kontakların lineer olmayan özellikleri, elektrik akımın doğrultulması, dönüşümü, amplifikasyonu veya elektrik sinyallerinin jenerasyonu için kullanılabilir. Bu tür doğrultucu eklemlerden diyot ve transistör yapılır [9] [12].

Metal – n tipi yarıiletken eklemden, yarıiletkenin iş fonksiyonu $q(\phi_n + \chi)$ metalin iş fonksiyonundan ($q\phi_m$) küçük ise, yarıiletkenden metale, Fermi seviyeleri eşit olana kadar, elektron akışı olur. Burada $q\phi_n$ Fermi seviyesi ile iletim bandı arasındaki enerji farkı, $q\chi$ ise yarıiletkenin elektron alınganlığıdır. Yarıiletkenden metale geçen elektronların arkalarında delikler bırakması sonucunda, yarıiletkenin kontak bölgesi civarında pozitif yük bakımından zengin bir bölge oluşur. Oluşan bu bölge arınma bölgesi (W) olarak adlandırılır.



Şekil 7 Metal-yarıiletken kontağın enerji diyagramı (a) metal ve yarıiletkenin vakum seviyesine göre enerji seviyeleri, (b) metal-yarıiletken eklem oluştuktan sonra enerji seviyeleri, δ aralığı (c) azaldığında ve (d) sıfırlandığında.

Yarıiletkenin enerji bandında, arınma bölgesinde bir bükülme oluşarak bir eğim meydana gelir. Bu eğime kontak potansiyeli (ψ_{bi}) adı verilir ve büyüklüğü,

$$q\psi_{bi} = q(\phi_m - (\chi + \phi_n)) \quad (2.4)$$

olarak ifade edilir.

Isısal dengedeki metal-yarıiletken eklem arasındaki bariyer yüksekliği ($q\phi_{Bn0}$) ise,

$$q\phi_{Bn0} = q(\phi_m - \chi) \quad (2.5)$$

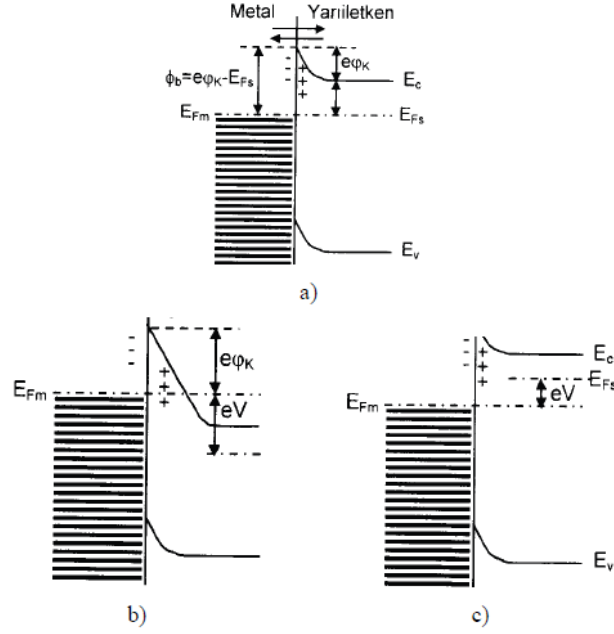
şeklinde ifade edilir.

Elektronların arınma bölgesinin (veya uzay yükü bölgesinin) kalınlığı,

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (\psi_{bi} - V - kT/q)} \quad (2.6)$$

olarak ifade edilir. Burada, ϵ_s yarıiletken malzemenin dielektrik sabiti, N_D donör konsantrasyonu ve V ise dışarıdan uygulanan potansiyeldir.

Eklemen metal tarafında yüksek elektron yoğunluğu olmasından dolayı bu bölgede arınma bölgesi meydana gelmez [5] [9].



Şekil 8 Metal n-tipi yarıiletken eklemi enerji band diyagramı a) denge durumu b) ters yönde c) ileri yönde gerilim uygulandığında

Metalden yarıiletkene elektronların geçişi potansiyel engelin yüksekliği, kontak potansiyellerinin farkı ve Fermi seviyesinin enerjisi ile belirlenir.

Denge durumunda, elektron akışı metalden yarıiletkene doğru ve karşı yönde aynıdır. Kontakta akım geçmez.

Yarıiletkene negatif gerilim uygulandığında, kontakın direnci devrenin direncinden çok büyük olduğundan dolayı, uygulanan gerilim kontakın yarı iletken tarafında dağılır. Bu durumda yarıiletken bandındaki enerji düzeyleri eV kadar aşağı kayar. Dışarıdan uygulanan negatif gerilimin etkisiyle, potansiyel engel yüksekliği artar, uzay yükü bölgesinin kalınlığı büyür.

Metal/yarıiletken kontakta pozitif gerilim uygulandığında ise, yarıiletkendeki tüm enerji seviyeleri yukarıya doğru kayar. Böylece potansiyel engelin yüksekliği azalır, uzay yükü bölgesinin kalınlığı küçülür ve elektron akımı artar [13] [14].

2.2.3 Metal – Yalıtkan – Yarıiletken (MIS) Eklemler

Metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapılar yarıiletken yüzeyleri anlamak için çok uygun yapılardır. Bu yapılar, yalıtkan filmin dielektrik özelliğinden dolayı, paralel plakalı bir kondansatöre benzer [15]. Levhaların birbirinden farklı tipte olması sebebiyle ise asimetrik kondansatör olarak adlandırılabilir [9].

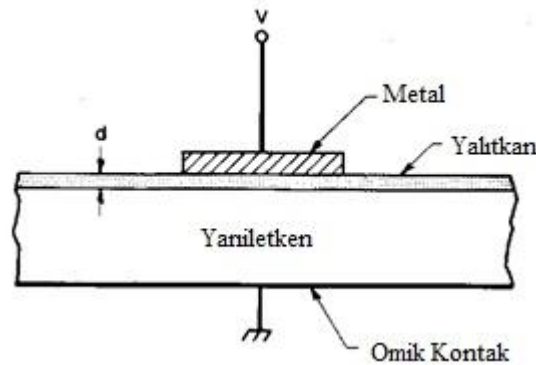
MIS yapısının belirgin özellikleri, paralel levhali kondansatörde olduğu gibi, yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir. Bunun için yapıdaki yalıtkan filmin dielektrik özelliğinin çok iyi olmasının yanı sıra, yalıtkan ile yarıiletken arayüzeyindeki doymamış bağların en az düzeyde olması aranan niteliklerdendir.

Doymamış bağlardan veya safsızlıklardan kaynaklanan yalıtkan-yarıiletken arayüzeyindeki durumlar ve yalıtkan tabaka büyütme sırasında yonteme bağı olarak ortaya çıkan hareketli iyonlar, tuzaklar ve arayüzey yüklerinin bulunması, MIS yapısının özelliklerini değıştirmekte, böylece MIS yapısının ideal özelliklerinden sapmalara neden olmaktadır [14].

2.2.3.1 İdeal MIS Yapısı

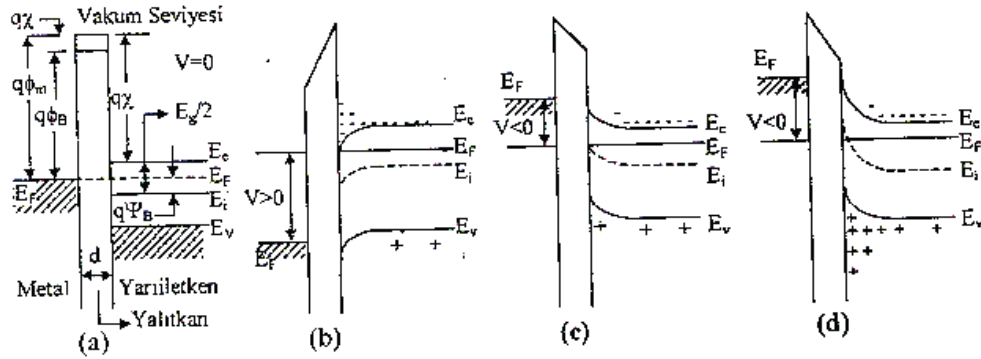
İdeal bir MIS diyetun özellikleri şöyle tanımlanır:

- a. Dışarıdan herhangi bir gerilim uygulanmadığında metal ve yarıiletken iş fonksiyonları birbirine eşittir [5].
- b. Yarıiletkende ve metal-yalıtkan yüzeylerinde yük oluşumu sadece bir gerilim uygulanması durumunda gerçekleşir [5].
- c. Yalıtkan malzemenin band aralığı çok büyük olduğundan yalıtkan tabakadaki serbest yük miktarı ihmal edilebilecek kadar küçüktür [5] [16].
- d. DC gerilim altında yalıtkan tabakadan yük geçişi olmaz. Direnci sonsuz olarak kabul edilir [5] [16].



Şekil 9 MIS Yapısı

MIS yapısı Şekil 9’ da gösterilmiştir. Burada V uygulanan gerilim, d ise yalıtkanın kalınlığıdır.



Şekil 10 İdeal MIS yapısının enerji-bant diyagramı.

a) $V=0$ durumu, b) $V>0$ yığılma durumu, c) $V<0$ tükenim durumu, d) $V<0$ tersinim durumu.

İdeal MIS yapısına gerilim uygulandığında yarıiletkende yük kaymaları oluşur. Yarıiletken arayüzey bölgesinde oluşan Q_{sc} uzay yükleri yarıiletken bandlarının bükülmesine sebep olur. Uygulanan gerilimin bir kısmı yarıiletken üzerine bir kısmı da yalıtkan üzerine düşer [5] [15].

$$V = V_i + \psi_s \quad (2.7)$$

Burada V_i yalıtkan üzerine düşen potansiyel, ψ_s ise yüzey potansiyelidir.

MIS yapısının kondansatöre benzerliğinden dolayı toplam yük,

$$Q_M + Q_{sc} = 0 \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir. Burada Q_M metal yüklerini, Q_{sc} ise uzay yükü bölgesinin yüklerini gösterir.

MIS yapısının kapasitesi, yalıtkan film ile yarıiletkenin arınma bölgesinin kapasitelerinin seri bağlanmasına eşittir.

$$C_i = \frac{\epsilon_i}{d} \quad (2.9)$$

$$C_D = \frac{\epsilon_s}{w_D} \quad (2.10)$$

$$C = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D} \quad (2.11)$$

Burada C_i yalıtkan filmin kapasitesi, C_D arınma bölgesinin kapasitesi, ϵ_i yalıtkan malzemenin dielektrik sabiti, ϵ_s yarıiletken malzemenin dielektrik sabiti ve d film kalınlığıdır. Yalıtkan filmin kapasitesi uygulanan gerilimle değişmediğinden, MIS yapısının kapasitesindeki değişimi sadece Q_{SC} uzay yükü kapasitesi belirler [5] [15] [16].

MIS yapısında metale uygulanan gerilime bağlı olarak n-tipi yarıiletken için yük dağılımında aşağıdaki durumlar gözlenir:

- a. Metale pozitif bir gerilim ($V>0$) uygulandığında, yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcıları olan elektronlar, yalıtkan/yarıiletken arayüzeyine yönelirler. Böylece valans bandları aşağıya doğru bükülür. Fermi düzeyi iletim bandına yaklaşır ve arayüzeydeki çoğunluk taşıyıcılarının yoğunluğu artar. Arayüzeydeki bu çoğunluk yüklerinin birikimine yığılma (accumulation) denir.
- b. Metale $V<0$ olacak şekilde küçük bir gerilim uygulandığında, enerji bandları yukarı doğru bükülür. Taşıyıcı yoğunluğunun arayüzey bölgesinde azalmasından dolayı, bu duruma tükenim (depletion) denir.
- c. Tükenim bölgesinde uygulanan negatif gerilim arttırılmaya devam edilirse, bandlar daha çok büyümeye başlar ve öz enerji seviyesi Fermi seviyesini geçer. Bu durumda tersinim (inversion) olayı gerçekleşir [5] [16].

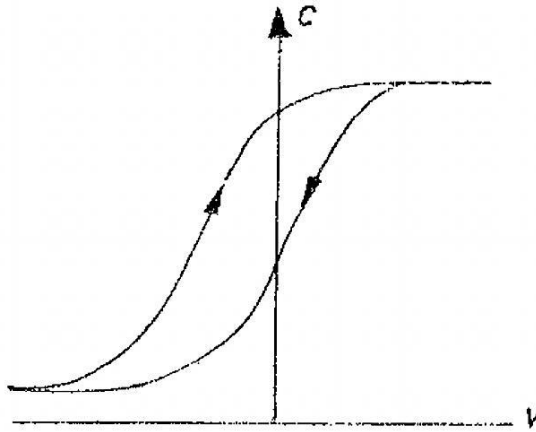
2.2.3.2 Gerçek MIS Yapısı

Gerçek MIS yapısında, ideal MIS yapısında bulunmayan arayüzey tuzakları, iyonlaşmış tuzaklar, hareketli iyonlar ve arayüzey yükleri gibi etkilerin bulunması, MIS yapının özelliklerinin değişmesine neden olur.

- a. **Arayüzey Tuzakları:** Yüzey civarında yarıiletkenin periyodik yapısının bozulması, yasak band aralığı içerisinde yeni enerji seviyelerinin oluşumuna sebep olur. Oluşan bu enerji seviyeleri “arayüzey durumları” ya da “arayüzey tuzakları” olarak adlandırılır. Arayüzey durumlarında bulunan yük yoğunluğu, yalıtkan kalınlığından ve yarıiletken katkı konsantrasyonundan etkilenmez. Arayüzey durumlarının yarattığı kapasite ve direnç etkisiyle, MIS

yapının C-V karakteristiği ideal MIS yapısına göre farklılık gösterir [5] [17].

- b. Yalıtkan içersinde tuzaklanmış yükler:** Yapının hazırlanması sırasında oluşan yapısal veya kimyasal bozukluklar nedeniyle, yükler yalıtkan tabaka içersinde tuzaklanabilir. Elektronlar veya delikler metal ya da yarıiletken içersinden yalıtkan tabakaya geçebilir. Yalıtkan içersinde tuzaklanan bu yükler MIS yapısının C-V karakteristiğinde pozitif gerilimden negatif gerilime doğru ve negatif gerilimden pozitif gerilime doğru gidilirken kapasite değerleri arasında bir fark meydana gelir. Kapasitans gerilim eğrisinin iki yönde ölçülen değerlerindeki kayma miktarı oksit içersindeki tuzaklanmış yüklerin miktarını verir [5] [18].

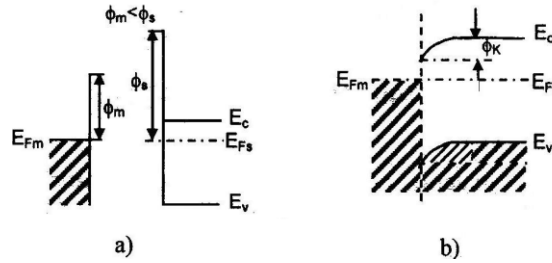


Şekil 11 MIS yapısında tuzaklanmalardan kaynaklı histerezis kayması

2.2.4 Omik Kontaklar

Akım-Gerilim karakteristiklerine göre metal/yarıiletken kontaklar iki sınıfa ayrılabilir. Doğrultucu karakteristiğe sahip olanlar Schottky kontaklar olarak, lineer karakteristiğe sahip olanlar ise ohmik kontaklar olarak adlandırılır. İyi bir performans alabilmek için yarıiletken aygıtlarda düşük dirençli omik kontaklar yapmak gereklidir. Yapılan omik kontak lineer karakteristiğe sahip olmalı, karakteristiği zamanla değişmemeli ve sıcaklık değişimlerine karşı kararlı davranış göstermelidir. İyi bir omik kontakın öz direnci 10^{-5} ohm.cm' den küçük olmalıdır.

n-tipi yarıiletken malzeme için, metalin çıkış işi yarıiletkenin çıkış işinden küçük ise ($\phi_m < \phi_s$) metalden yarıiletkene doğru elektron akışı olur ve yarıiletkenin enerji bandları yüzey civarında aşağıya eğilir. Yarıiletkenin enerji bandlarının bükülmesi sonucu yüzey civarında çoğunluk taşıyıcılarının konsantrasyonu daha büyük olur ve yüzey bölgesinin direnci iç bölgelere nazaran daha düşük bir seviyeye gelir. Bu oluşan yapı omik kontak olarak adlandırılır [5] [9].



Şekil 12 Metal-n-tipi yarıiletken $\phi_m < \phi_s$ için durumunda, a) temas öncesi band diyagramı, b) temas sonrası band diyagramı

Deneysel çalışmalarda tam lineer akım gerilim karakteristikli metal yarıiletken kontağı yapmak zordur. Kontakın akım gerilim karakteristiği lineer olmadığı durumda, kontakın doğrultma derecesi, akımın doğru ve ters yöndeki değerlerinin eşit gerilimlerdeki oranıyla belirlenmektedir. Bu akımların oranı kontakın doğrultma katsayısı olarak tanımlanır. İdeal omik kontakın doğrultma katsayısı bir'dir [10].

2.2.5 İletkenlik Mekanizmaları

2.2.5.1 Termiyonik Emisyon Teorisi

Termiyonik Emisyon (TE) , sıcaklık etkisiyle bir yüzeyden taşıyıcıların salınması anlamına gelir. Schottky kontaklarda, yeterli ısısal enerjiyi kazanan taşıyıcıların, potansiyel engel üzerinden, yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmeleridir.

Termiyonik emisyon teorisi Bethe'nin varsayımları üzerine kurulmuştur. Bethe'nin varsayımları şu şekildedir:

- 1) Potansiyel engelin yüksekliği, kT / q enerjisinden çok büyüktür.
- 2) Yük geçişinin gerçekleştiği yüzeyler arasında termal denge kurulmuştur.
- 3) Net akım bu denge durumunu etkilemez.

Oluşan akım sadece bariyer yüksekliğine bağlıdır. Yarıiletken den metale doğru oluşan akım yoğunluğu bariyer engelini aşan ve x doğrultusunda hareket edecek enerjideki elektronların yoğunluğu ile ifade edilir.

$$J_{s \rightarrow m} = \int_{E_{Fn} + q\phi_{Bn}}^{\infty} qv_x dn \quad (2.12)$$

Buradaki $E_{Fn} + q\phi_{Bn}$ termiyonik emisyon için gerekli olan minimum enerji, v_x ise taşıyıcının sürüklenme hızıdır. Artan bu enerji aralığındaki elektron yoğunluğu;

$$dn = N(E)F(E)dE$$

$$\approx \frac{4\pi(2m^*)}{h^3} \sqrt{E - E_c} \exp\left(-\frac{E - E_c + q\phi_n}{kT}\right) dE \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $N(E)$ durum yoğunluğu, $F(E)$ dağılım fonksiyonu, h Planck sabiti, m^* elektronun etkin kütlesi ve k Boltzman sabitidir.

İletim bandındaki elektronların bütün enerjilerinin kinetik enerji olduğu varsayımıyla hareket edersek (2.13) denklemi,

$$n \approx 2 \left(\frac{m^*}{h}\right)^3 \exp\left(-\frac{q\phi_n}{kT}\right) \exp\left(-\frac{m^*v^2}{2kT}\right) (4\pi v^2 dv) \quad (2.14)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (2.14), denklem (2.12) içerisinde kullanılırsa yarıiletken den metale doğru akım yoğunluğu;

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3}\right) T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_n}{kT}\right) \exp\left(-\frac{m^* v_{0x}^2}{2kT}\right) \quad (2.15)$$

olur. Burada v_{0x} , taşıyıcının bariyeri aşması için gerekli olan minimum hızının x bileşenidir. v_{0x} hızına sahip taşıyıcının enerjisi $q(\psi_{bi} - V)$ olur. $\phi_{Bn} = \phi_n + \psi_{bi}$ eşitliğinden faydalanarak denklem (2.15)'deki akım yoğunluğu ifadesi

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right) \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.16)$$

şekline dönüşür. Burada A^* etkin Richardson sabitidir ve

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir.

Metalden yarıiletkene geçen elektronların karşılaştığı bariyer yüksekliği uygulanan gerilimden etkilenmez. $V=0$ durumunda, metalden yarıiletkene olan akım yoğunluğu ile

yarıiletken den metale olan akım yoğunluğu birbirine eşit ve zıt yönlüdür. Metalden yarıiletkene akım yoğunluğu ifadesi ise,

$$J_{m \rightarrow s} = -A^* T^2 \left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT} \right) \quad (2.18)$$

olarak yazılır.

Toplam akım yoğunluğu denklem (2.16) ile (2.18)' in toplamıdır.

$$\begin{aligned} J_n &= \left[A^* T^2 \exp \left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT} \right) \right] \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \\ &= J_{TE} \left[\exp \left(-\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

Burada , Termiyonik Emisyon Teorisi'ne göre akım yoğunluğu ifadesi, J_{TE} ;

$$J_{TE} = A^* T^2 \exp \left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT} \right) \quad (2.20)$$

olarak yazılır.

2.2.5.2 Difüzyon Teorisi

Aralarında yoğunluk farkı bulunan bölgeler arasında, yüklerin yoğunluğunun çok olduğu bölgeden az olduğu bölgeye geçişlerine *difüzyon* denir. Schottky tarafından ortaya koyulan teori şu varsayımlara dayanır [5] [7].

1. Potansiyel engel yüksekliği kT / q enerjisinden çok büyüktür.
2. Boşaltılmış bölgedeki elektronların çarpışma ihtimalleri dahil edilmiştir.
3. $x = 0$ ve $x = W_D$ 'deki taşıyıcı konsantrasyonları akımdan etkilenmez.
4. Yarıiletkendeki safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir yani katkı atomları yoğunluğu değişmez.

Bu varsayımlardan yola çıkarak boşaltılmış bölgedeki akım, bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olduğundan metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için boşaltılmış bölgedeki akım yoğunluğu;

$$\begin{aligned} J_x &= J_n = q \left[n(x) \mu_n E(x) + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] \\ &= q D_n \left(\frac{n}{kT} \frac{dE_c}{dx} + \frac{dn}{dx} \right) \end{aligned} \quad (2.21)$$

şeklinde yazılabilir. Burada D_n elektron difüzyon sabiti, $E_{(x)}$ schottky bölgesinde konuma bağlı elektrik alan, μ_n elektron mobilitesi ve $n(x)$ konuma bağlı elektron yoğunluğudur. Difüzyon teorisine göre akım yoğunluğu,

$$J_n = J_{SD} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.22)$$

şeklindedir. Burada J_{SD} doyma akım yoğunluğu olup,

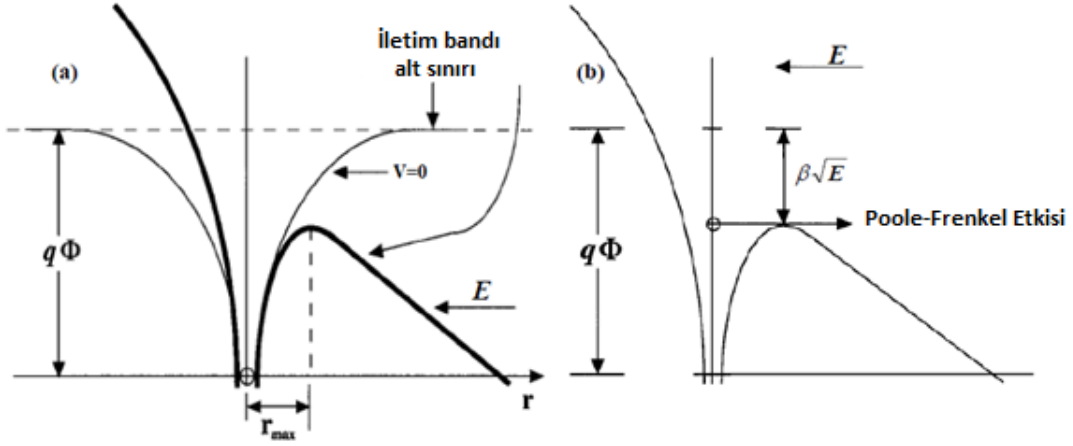
$$J_{SD} = \left(\frac{q^2 N_c D_n}{kT} \right) \left[\sqrt{\frac{2q(V_D - V) N_D}{\epsilon_s}} \right] \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.23)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N_c iletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu, V_D difüzyon voltajı, N_D verici yoğunluğu, ϵ_s ise yarıiletkenin dielektrik geçirgenliğidir. Yukarıda bağıntılarda $n(x)$ yerine $p(x)$, D_n yerine D_p , N_c yerine N_v , N_D yerine N_A yazıldığında benzer işlemler metal/p-tipi yarıiletken kontaklar için de geçerli olacaktır.

Bu iki teoriden elde edilen ifadeler birbirine oldukça benzerdir, bununla birlikte difüzyon teorisi modelinde doyma akım yoğunluğu J_{SD} , voltaja bağlı olarak daha çabuk değişir fakat sıcaklığa bağlılığı termiyonik emisyon teorisindeki (TE) doyum akım yoğunluğuna göre daha küçüktür [5] [7].

2.2.5.3 Poole-Frenkel Mekanizması

Poole-Frenkel mekanizması, yük taşıyıcılarının, yalıtkanın iletkenlik ve valans bandındaki Coulombik tuzak seviyelerinden uygulanan gerilimle termal emisyonu olarak tanımlanabilir [19]. Oluşan elektrik alan, potansiyel kuyusu şeklindeki tuzağın bir tarafındaki bariyer yüksekliğini azaltarak, elektronun tuzaktan kurtulma olasılığını artırır. Şekil 13(a-b) Poole-Frenkel etkisi ile bariyer düşüşünü göstermektedir.



Şekil 13 a) Coloumbik potansiyel kuyusu b)Elektrik alan uygulandığında potansiyel kuyusundaki Poole-Frenkel etkisi

Poole-Frenkel mekanizmasının gerçekleşebilmesi için içerisi elektron ile dolu olduğunda tuzak nötr, elektronu salıverdiğinde ise tuzak pozitif yüklü olmalıdır [20].

Şekil 13(b)'de ki $q\phi$ değeri elektronun elektrik alan olmadan tuzak dışına çıkması için gerekli olan enerjidir. Dışarıdan uygulanan gerilim ile Coulombik bariyerde oluşan Poole-Frenkel azalması

$$\Delta\phi_{PF} = \left(\frac{q^3}{\pi\epsilon_0\epsilon_{ih}} \right)^{1/2} E^{1/2} = \beta_{PF} E^{1/2} \quad (2.24)$$

şeklinde yazılabilir. Burada E uygulanan elektrik alan, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti ve ϵ_{ih} yalıtkan malzemenin yüksek frekanslardaki dielektrik sabitidir. Elektrik alan uygulanmasıyla tuzak bariyer yüksekliğinin etkin değeri $q\phi - \beta_{PF} E^{1/2}$ olur. Uygulanan elektrik alana bağlı iletkenlik ifadesi;

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\beta_{PF} E^{1/2}}{2kT} \right) \quad (2.25)$$

şeklinde ifade edilir. Poole-Frenkel mekanizmasına göre, akım yoğunluğu ifadesi ise;

$$J_{PF} = nq\mu E \exp\left(-\frac{q\phi}{kT}\right) \exp\left(\frac{\beta_{PF} E^{1/2}}{kT}\right) \quad (2.26)$$

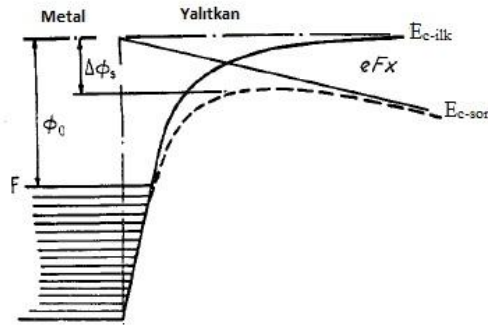
olarak yazılabilir.

2.2.5.4 Schottky-Richardson Emisyonu

Taşıyıcıların iletimi yalıtkan yüzeydeki kontak potansiyeli ile sınırlandığında yalıtkan üzerindeki yük akışı, bariyer yüksekliğini termal enerji ile aşabilecek taşıyıcılara bağlıdır. Termiyonik emisyon ile oluşan akım yoğunluğu sıcaklık ilişkisi;

$$J = A^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi}{kT}\right) \quad (2.27)$$

şeklindedir. Metal yüzeyindeki kutuplanma ile oluşan görüntü yükleri taşıyıcı yüklerin yayılmasını sağlar. Bu sayede kontak potansiyeli uygulanan elektrik alan ile değişir.



Şekil 14 Bariyer yüksekliğinin elektrik alan ile değişimi

Elektrik alana bağlı olarak kontak potansiyel yüksekliğindeki değişim;

$$\Delta q\phi = \beta_{SR} E^{1/2} \quad (2.28)$$

olarak belirlenir. Burada, β_{SR} Schottky-Richardson katsayısıdır ve;

$$\beta_{SR} = \sqrt{\frac{q^3}{4\pi\epsilon_0\epsilon_{ih}}} \quad (2.29)$$

eşitliğiyle verilir.

Schottky-Richardson etkisi ile akım yoğunluğunu belirleyebilmek için denklem (2.27)'deki bariyer yüksekliği etkin bariyer yüksekliği ile değiştirilmelidir.

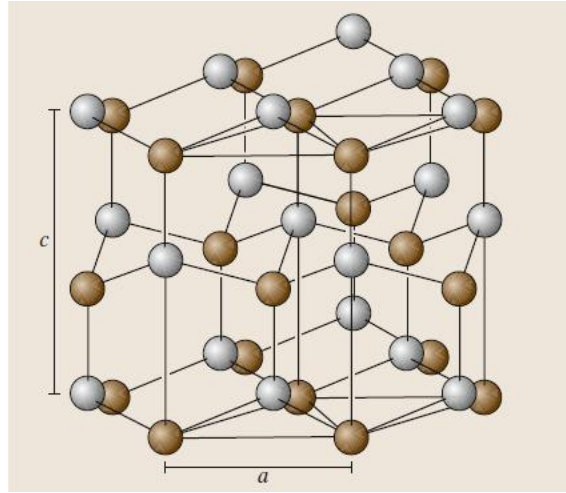
Denklem (2.27) etkin bariyer yüksekliği ile tekrar yazılırsa;

$$J_{SR} = A^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi}{kT}\right) \exp\left(\frac{\beta_{SR} E^{1/2}}{kT}\right) \quad (2.30)$$

olarak belirlenir [19].

2.2.6 CdS' in Kristal yapısı ve Parametreleri

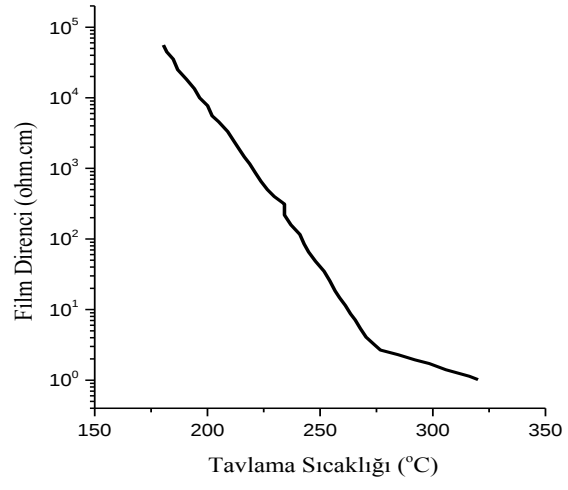
II-VI grubu yarıiletkenlerinden olan CdS bileşiği doğal olarak, n-tipi elde edilen bir malzemedir. CdS hem kübik hem de hekzagonal wurtzite yapıda kristalleşebilmektedir; ancak daha kararlı olduğu yapı hekzagonal wurtzite'dir. Şekil 15. CdS kristalinin hekzagonal yapısını göstermektedir.



Şekil 15 CdS bileşiğinin hekzagonal wurtzite kristal yapısı

CdS filmler, In, Sn, Al, Cl veya Br ile kolaylıkla katkılanır ve tüm bu katkı maddeleri ile yüzeysel donör safsızlıklarına sahip malzemeler oluşturulur. Film veya kristal büyütme sırasında aşırı Cd varlığı ile ek bir safsızlık katkısı yapılmasa bile, 0.1 ohm un altında öz direnç değerleri gözlenebilir. Eğer CdS filmin yüzeyinde ve tanecik sınırlarında oksijen soğuruluyorsa, CdS iletim bandından elektronların ayrılarak oksijenle kimyasal bağ oluşturması söz konusudur ve bu, yüzeyde ve tanecik sınırlarında bir tüketim tabakası meydana getirir. Soğurulan oksijen, vakum içerisinde çeşitli ısısal işlemler yardımı ile yapıdan çıkarılır.

CdS filmlerin direnci ısısal işlemler ile önemli şekilde değiştirilebilir. Şekil 16. da tavlama sıcaklığına bağlı olarak direnç değişim grafiği verilmiştir [21].



Şekil 16 CdS filmlerin direncinin tavlama sıcaklığına bağlılığı [21]

Çizelge 1 CdS'in özellikleri

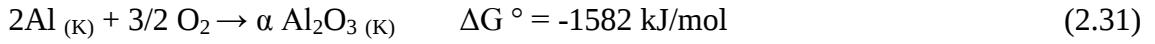
Kristal Yapısı	Wurtzite
Örgü Parametreleri (nm)	a=0.41348 c=0.67490
Yasak Enerji Aralığı (E_g) (T=300K)	2.42-2.5 eV
İletkenlik Tipi	ntipi
Erime Noktası (K)	1750
Yoğunluk (ρ) (300K)	4.82 g/cm ³
Molekül Ağırlığı	144.477 amu
Lineer Termal Genleşme Katsayısı	$7.04 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Isı Sığası (300K)	55.20 J/mol.K
Termal İletkenlik (κ)	0.20 W/cm.K
Debye Sıcaklığı	219.32 K
Elektron Etkin Kütle Oranı (m_e^*/m_0)	0.25
Delik Etkin Kütle Oranı (m_h^*/m_0)	0.7
Elektron Hall Mobilitesi (μ_e)	340 cm ² /V.s
İş Fonksiyonu ($q\phi_0$)	1.5±1.5 eV
Elektron Alınganlığı (χ)	4.8 V
Arayüzey Tuzak Yoğunluğu (D_{it})	$1.6\pm 1.1 \times 10^3 \text{ eV.cm}^2$
Dielektrik Sabiti	8.28
Richardson Sabiti (A^*)	25

2.2.6 Al₂O₃'ün Elektrokimyası

Aluminyumun elektrokimyasal olarak oksidasyonunun tarihçesi geçtiğimiz yüzyıla dayanır. Yıllardan beri anodik proses, kromik, sülfürik, okzalik asit gibi elektrolitler kullanılarak ele alınmıştır.

Anodizasyon, aluminyumun metalik görünüşünün korunduğu tek yüzey işlemidir. Anodik kaplamalar küçük ve muntazam gözeneklidir. Gözenek boyutu genelde anodizasyon voltajına bağlıdır ve tipik olarak 1 nm/volt mertebesinde. Değişik elektrolitlerin kullanımı 10~250 nm çapında gözenek elde etmeyi mümkün kılar. 10²-10⁵/m² düzeyinde gözenek yoğunluğu elde edilebilir ve 100 µm'a erişen kalınlıkta anodik kaplamalar üretilebilir [22].

Atmosferde aluminyum üzerinde oksidin oluşumu için doğal reaksiyon ilerleyişi geniş negatif Gibbs serbest enerji değişimi ile yorumlanır.



Eğer aluminyum elektrokimyasal anotlanırsa; anotta oksit büyür.



Katotta hidrojen gazı gelişir.



Kompleks anyonların olmadığı kabul edilirse, Nernst eşitliği;

$$E = E^\circ - (RT/zF) \ln Q \quad (2.35)$$

$$E = -1.550 - 0.0591 \text{ pH} \quad (2.36)$$

Bu açıklar ki anot elektrotteki (Al) reaksiyon termodinamik olarak pH değerine bağlıdır. Bu elektrolit ve sıcaklık ile belirlenir [22].

Çizelge 2 Al₂O₃ 'ün özellikleri

Kristal Yapısı	Corundum
Yoğunluk	3.95 g/cm ³
Örgü Sabitleri	a=4.785 Å , c=12.991 Å
Erime Noktası (K)	2303
Optik Transmisyon Aralığı	0,17 – 5,5 µm
Özgül Isı J(kg x K)	850 - 920
Termal İletkenlik (300 K)	15-35 W/mK
Özdirenç	1016 (25°), 1011 (500°), 106 (1000°) Ohm.cm
Dielektrik sabiti	8,5 - 11.5
Dielektrik Kuvveti	4.10 ⁵ V/m
Hacim Özdirenci	>10 ¹⁴ Ohm.cm
Molekül Ağırlığı	101.96 g/mol
Band Aralığı	< 9.5 eV
Isı Sığası	0,880 j/g.°C

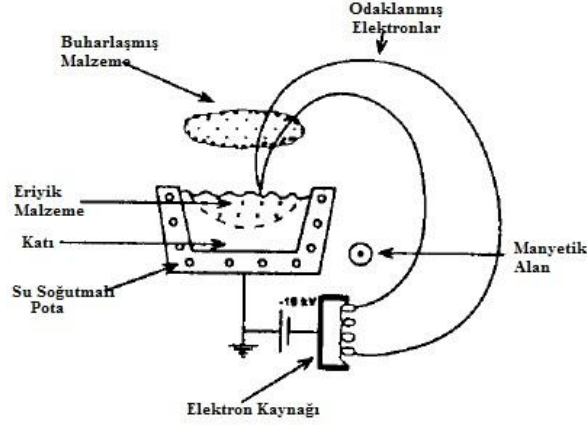
ÜRETİM YÖNTEMLERİ

3.1 Elektron Demeti

Buhar biriktirme işlemleri, fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) olarak iki grup altında toplanır. Fiziksel buhar biriktirme, farklı yöntemlerle üretilen kaynak buharın film oluşturmak için bir yüzey üzerine yoğunlaştırılması işlemidir.

PVD işlemleri üç ana süreçten oluşur. Bunlardan ilki buhar fazı üretimidir. Malzeme buhar haline, buharlaştırma, söktürme vb. ile getirilir. İkinci adım buharın kaynaktan hedef tabana taşınmasıdır. Moleküler akış, buhar iyonlaştırma yoluyla gerçekleştirilir. Üçüncü basamak ise taban üzerinde film geliştirme sürecidir. Bu süreç kaynak buharın taban üzerinde yoğunlaşmasını ve gelişme süreci ile filmin oluşmasını kapsar.

Elektron demeti ile fiziksel buhar biriktirme ise anottaki malzemenin çok yüksek vakumda tungsten bir flaman ile elektron bombardımanına maruz bırakılmasıyla gerçekleşir. Bu yüksek enerjili elektronlar pota içerisinde bulunan malzemenin gaz faza geçmesini sağlar [23].



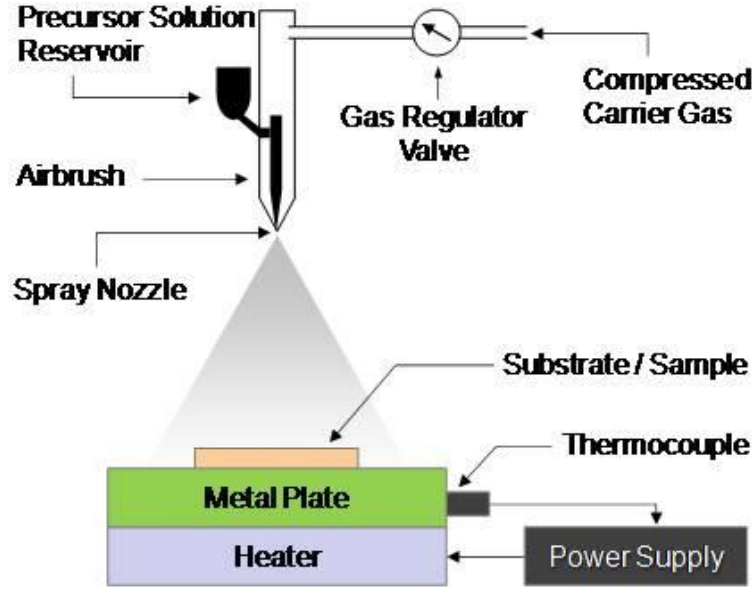
Şekil 17 Elektron demeti ile fiziksel buharlaştırma sistemi

Flaman yeterli sıcaklığa ulaştığında elektron yaymaya başlamaktadır. Kopan elektronlar, manyetik ve elektrik alan yardımıyla buharlaştırılacak olan malzemenin üzerine yönlendirilir. Bu yöntemle sadece işlenmesi kolay alüminyum, altın, gümüş gibi elementler değil ayrıca titanyum, tantalum gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemeler ve molibden, tungsten gibi düşük buhar basınçlı elementler de buharlaştırılabilir.

Buharlaştırma esnasında film kaplama hızı yavaş veya hızlı değerlerde ayarlanabilir. Bu yöntem, malzemenin yapısal ve morfolojik özelliklerinin kontrolü konusunda zorluklar göstermesi, yöntemin dezavantajı olarak belirtilebilir [21] [24] [25].

3.2 Sprey Buharlaştırma

Sprey Buharlaştırma (SB) tekniği basit bir yöntem olup, çözeltinin, temiz kuru hava yardımıyla sıcak altlıklar üzerine püskürtülmesi olarak tanımlanabilir [26]. Sprey Buharlaştırma yöntemi basit bir teknik olmasına rağmen çok tercih edilen bir kaplama yöntemidir. Yüksek vakuma ihtiyaç duymaması, film kalınlığının değiştirilebilmesi, geniş sıcaklık aralığında çalışma imkanı gibi avantajlarının olması tercih edilmesinin başlıca sebeplerindendir.



Şekil 18 Sprey Buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi

Sprey Buharlaştırma yönteminin temelini kimyasal reaksiyonlar oluşturur. Isıtıcı üzerindeki altlıklar istenilen sıcaklığa yükseltilir. Çözelti hava aracılığıyla sıcak tabanlara gönderilir. Atomize olan damla tanecikleri sıcak tabana ulaştığında buharlaşır. Atomize olmuş çözelti sıcak tabana geldiğine tabanların sabit sıcaklıkta tutulması önemlidir. En ideal film oluşumu, damlaların taban üzerine düştüğü anda buharlaşmasıyla mümkün olur [27].

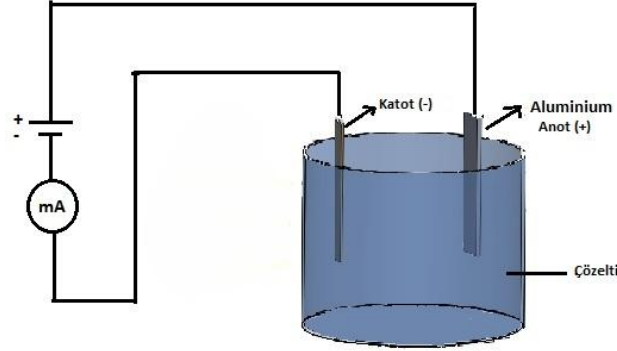
Elde edilen filmlerin özellikleri farklı parametrelere göre değişir. Bunlar püskürtülen çözelti miktarı, taban sıcaklığı, püskürtme hızı, tabanın cinsi, püskürtme süresi, püskürtme başlığı ile taban arasındaki mesafe, taşıyıcı gazın cinsi, akış hızı ve kullanılan çözeltinin molaritesidir [28].

3.3 Anodik Oksidasyon

Aluminyum yüzeyinde oluşan çok sert aluminyum oksit tabakası, aşınmaya karşı çok dayanıklı olduğundan, aluminyuma üstün özellikler kazandırır. Oksit tabakasının şeffaf yapısı, aluminyumun metalik görünümünü ortaya çıkarır ve bu özellik sayesinde aluminyum yüzeyine parlak veya mat görünüm verecek çeşitli mekanik veya kimyasal işlemler uygulanabilir.

Anodik oksidasyon, aluminyum için çok özel bir yüzey kaplamadır. Aluminyum ya da alaşımlarının yüzeyinde kendiliğinden oluşan oksit filmi anodik oksidasyon ile biraz

daha kalınlaştırılır. Genellikle elektrolit olarak asidik bir çözelti kullanılır. Kaplanacak alüminyum elektroliz işleminin anodudur. Belirli ve kontrol edilen bir akım yoğunluğu, kaplanacak alüminyum ile uygun bir katot arasında, yine belirli bir süre için geçirilir. Bu süre, oluşacak oksit tabakasının özellik ve kalınlığına göre belirlenir. Asit içinde alüminyum kısmen çözünür ve alüminyum oksitten oluşan bir tabaka oluşur [29].



Şekil 19 Anodik Oksidasyon yönteminin şematik gösterimi

Anodik oksidasyon sonrasında oluşan oksit yapısı amorf yapıdadır [30]. Oluşan oksit yapının kalınlığı alaşım özelliklerine, uygulanan voltaja, elektrolit sıcaklığına ve anodizasyon süresine bağlı olarak değişmektedir [31].

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Al₂O₃ Tabakasının Oluşturulması

Oksit tabaka, alüminyum yüzeyinde anodik oksidasyon metodu kullanılarak oluşturuldu. 3 cm x 3 cm boyutlarında kesilen alüminyum tabakalar anodik oksidasyon metodu uygulanmadan önce bazı temizleme işlemlerinden geçirildi.

Alüminyum tabakaların yüzeylerindeki pürüzleri gidermek için 1000 gritlik zımpara kağıtları kullanılarak yüzeyleri parlatıldı. Daha sonra distile su içerisinde yaklaşık 15 dk kadar bekletildi. Yüzeyde kalan kirlilikler etanol yardımıyla temizlenerek alüminyum yüzeyleri homojen hale getirildi. Kurutma işlemi için azot gazı püskürtülerek yüzeydeki sıvılardan arındırıldı.

4.1.1 Al₂O₃ Tabakasının Anodik Oksidasyon Yöntemiyle Oluşturulması

Deneysel çalışmada çalışma anot olarak alüminyum, katot olarak paslanmaz çelik, çözelti olarak da %6 'lık sülfürik asit çözeltisi kullanılmıştır.

Anodik oksidasyon hücresine 150 mA sabit akım uygulandı. Uygulanan gerilim sayesinde sülfürik asit ve su ayrışır. Ayrışma sonucunda H⁺ iyonları katoda giderek hidrojen gazına indirgenir.



Aynı anda negatif yüklü anyonlar (hidroksit, sülfat, oksit) anoda doğru yönelir. Akımın verilmesiyle oluşan elektriksel yük, alüminyum metalinin çözünerek pozitif yüklü alüminyum iyonları (Al^{3+}) oluşturmaya neden olur. Oluşan Al^{3+} iyonları yüzeyde oksit/hidroksit iyonları ile reaksiyona girerek alüminyum oksit formu oluşturur [30] [32] [33].



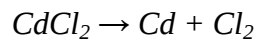
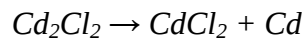
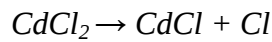
Farklı sürelerde yapılan anodik oksidasyon işleminden sonra farklı kalınlıklarda oksit tabakalar elde edildi. Elde edilen farklı kalınlıklardaki oksit tabakalar distiyle suyla yıkandı ve üzerlerine spreylen buharlaştırma yöntemiyle CdS kaplanarak Al_2O_3/CdS eklem oluşturuldu.

4.2 Al_2O_3/CdS Eklemının Oluşturulması

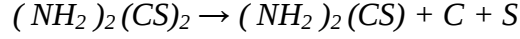
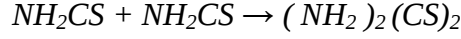
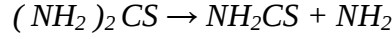
CdS filmlerin spreylen buharlaştırma yöntemi için hazırlanan çözeltide Cd kaynağı olarak $CdCl_2$, S kaynağı olarak ise $(NH_2)_2CS$ (thiourea) kullanıldı. Çözeltinin hazırlanmasında 0,02 M $CdCl_2$ ve 0,02 M $(NH_2)_2CS$ distile su içerisinde çözüldü. Malzemelerin su içerisinde tam olarak çözünmesini sağlamak için hazırlanan çözelti manyetik karıştırıcı da sıcaklık 55°C 'ye gelene kadar karıştırıldı. Çözelti, içerisindeki kirliliğin çökmesi için kapalı bir kapta bir gün boyunca oda sıcaklığında bekletildi. Daha sonra çözelti süzgeç kağıdı kullanarak spreylen işleminin yapacağı kaba aktarıldı.

Daha önceden anodik oksidasyon metoduyla alüminyum yüzeyinde oluşturulan oksit tabakalar ısıtıcı üzerine yerleştirilerek 400°C ' de yaklaşık 45 cm uzaklıktan püskürtülerek kaplama işlemi gerçekleştirildi. Çözelti oksit tabakanın üzerine geldiğine Cd ve S dışındaki tüm bileşenler buharlaşmakta ve oksit tabaka üzerine CdS filmi kaplanmaktadır.

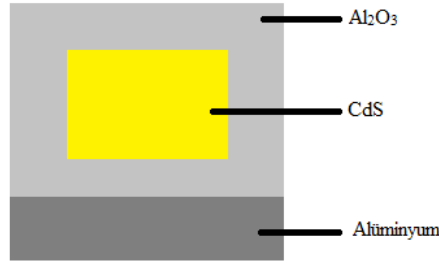
$CdCl_2$ ' den Cd' nin ayrılması aşağıdaki reaksiyon zinciriyle oluşmaktadır [34].



$(NH_2)_2CS$ ' den S elde edilmesi aşağıdaki reaksiyon zinciriyle oluşmaktadır [34].



Elde edilen Al_2O_3/CdS eklemünde CdS yüzeyindeki pürüzlülüğü azaltmak için $5\mu m$ ' lik elmas pasta ile yüzeyi parlatıldı. Eklem üzerine kontak alınması için CdS üzerine 2 mm yarıçaplı maskeler yerleştirildi. GaIn metali damlatma yöntemiyle eklem üzerine kaplandı.

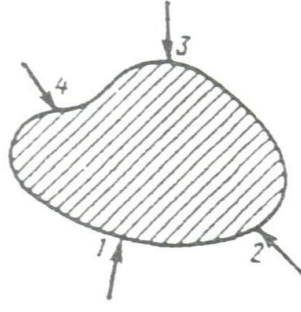


Şekil 20 Al/ Al_2O_3 /CdS yapısı

4.3 CdS Filmlerin İletkenlik, Özdirenç ve Taşıyıcı Yoğunluğu Ölçümleri

Yarıiletkenin iletkenlik tipinin belirlenmesi için Hot-Probe yöntemi kullanıldı. n -tipi malzeme ısıtıldığında elektron konsantrasyonu sıcaklığın yüksek olduğu bölgede artar. Bu nedenle elektronlar daha soğuk bölgeye hareket eder. Bunun sonucunda n -tipi yarıiletkende daha sıcak bölgede pozitif hacimsel yük, soğuk bölgede ise elektron konsantrasyonunun fazlalığından oluşmuş negatif yük meydana gelmektedir.

CdS örneklerinin özdirenç ölçümleri Van der Pauw yöntemiyle yapıldı. Bu yöntem, belirli bir geometriye sahip olmayan düzlemsel örneklerin özdirençlerini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Özdirenci belirlemek için CdS örneklerinin üzerinden 4 farklı noktadan GaIn ile omik kontaklar alınır.

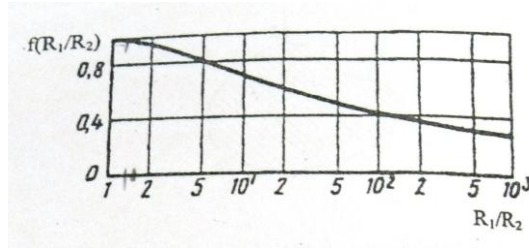


Şekil 21 Van der Pauw yöntemi ile kontakların yerleşimi

Örneğin 1 ve 4 numaralı kontakları arasından I_{14} akımı geçirilerek V_{23} potansiyeli 2 ve 3 numaralı kontaklar ile ölçülür. I_{14} ve V_{23} ile ohm yasasında R_1 direnci hesaplanır. Daha sonra 1 ve 2 numaralı kontaklar arasından akım geçirilerek 3 ve 4 numaralı kontaklar arasındaki potansiyel ölçülür ve benzer şekilde R_2 direnci hesaplanır.

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln(2)} \frac{R_1 + R_2}{2} f\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (4.5)$$

elde edilen direnç değerleriyle birlikte denklem (4.5) kullanılarak malzemenin öz direnci belirlenir. Burada d malzeme kalınlığı $f\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$ ise düzeltme fonksiyonudur. Düzeltme fonksiyonunun grafiği Şekil 22 yardımıyla hesaplanır.

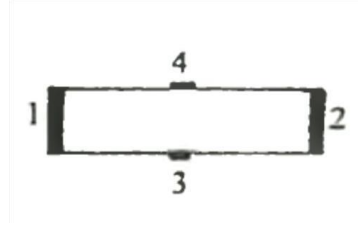


Şekil 22 Van der Pauw yönteminde düzeltme fonksiyonunun grafiği

Yarıiletkenin taşıyıcı konsantrasyonunu hesaplamak için Hall sabitinin bulunması gerekmektedir. Hall sabitinin, Hall gerilimi ile bağıntısı şu şekildedir.

$$R_H = \frac{V_H b}{I \cdot B} \quad (4.6)$$

Burada B manyetik alan, b örneğin kalınlığı, I ise devreden geçen akım değeridir. Hall ölçümleri için dikdörtgen formülü örnekler kullanılmıştır.



Şekil 23 Dikdörtgen formlu örneğin ve kontaklarının gösterimi

Hall ölçümü yapılırken 1 ve 2 numaralı kontaklardan akım geçirilir 3 ve 4 numaralı kontaklar arası Hall gerilimi ölçülür. Manyetik alan vektörü örneğin büyük alanlı yüzeyine diktir. Katkılı yarıiletkenler için Hall sabiti denklem (4.6) kullanılarak hesaplanır.

Hall gerilimini hatasız ölçmek için 3 ve 4 numaralı kontaklar arasında oluşan parazit gerilimlerin etkisini ortadan kaldırmak gerekir. Parazit gerilimler, birçok neden dolayı oluşabilir. 3 ve 4 numaralı kontakların örneğin birbirine tam karşı noktalarına yerleşmediği zaman parazit gerilim oluşabilir. Parazit gerilimlerinin çoğu elektrik akımının ve manyetik alanın yönüne bağlıdır. Bu nedenle akımın ve manyetik alanın yönlerini değiştirmekle, Hall gerilimine etki gösterebilen gerilimleri ortadan kaldırmak mümkündür. 3 ve 4 numaralı kontaklar arasındaki hatasız Hall gerilim değeri,

$$V_H = \frac{1}{4} [V_H(+I, +H) + V_H(-I, +H) + V_H(+I, -H) + V_H(-I, -H)] \quad (4.7)$$

ile hesaplanır. Bununla birlikte taşıyıcı konsantrasyonu hesabı n-tipi yarıiletken için

$$n = -\frac{1}{R_H e} \quad (4.8)$$

ile verilir [9] [10] [21].

CdS örneğin iletkenlik tipinin ölçülmesi için kullanılan termoelektrik yöntem ile yarıiletken n-tipi olarak belirlendi. Yapılan ölçümler sonucunda CdS filmlerin öz direnci $2,01 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$, taşıyıcı yoğunluğu ise Hall ölçümü ile $1,974 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ olarak bulundu.

4.4 Optik Ölçümler

CdS filmlerin optik geçirgenlik ölçümleri için *Perkin Elmer Lambda 2S* UV-Vis spektrometresi kullanıldı. $\lambda = 300-1100 \text{ nm}$ aralığında optik ölçümler yapıldı. Oda sıcaklığında dalgaboyuna bağlı geçirgenlik ölçümleri ($T-\lambda$) ile filmlerin yasak band aralıkları hesaplandı.

$$\alpha^2(h\nu)^2 = B(h\nu - E_g) \quad (4.9)$$

Yasak band aralığı direk band yapısına sahip yarıiletkenler için denklem (4.9) kullanılarak hesaplandı. Burada h Planck sabiti, ν gelen ışığın frekansı, E_g yasak band aralığı ve α soğurma katsayısıdır.

$I=I_0 \cdot e^{-\alpha d}$ eşitlendiğinden faydalanarak soğurma katsayısının hesaplanması için denklem (4.10) 'un grafiği kullanıldı.

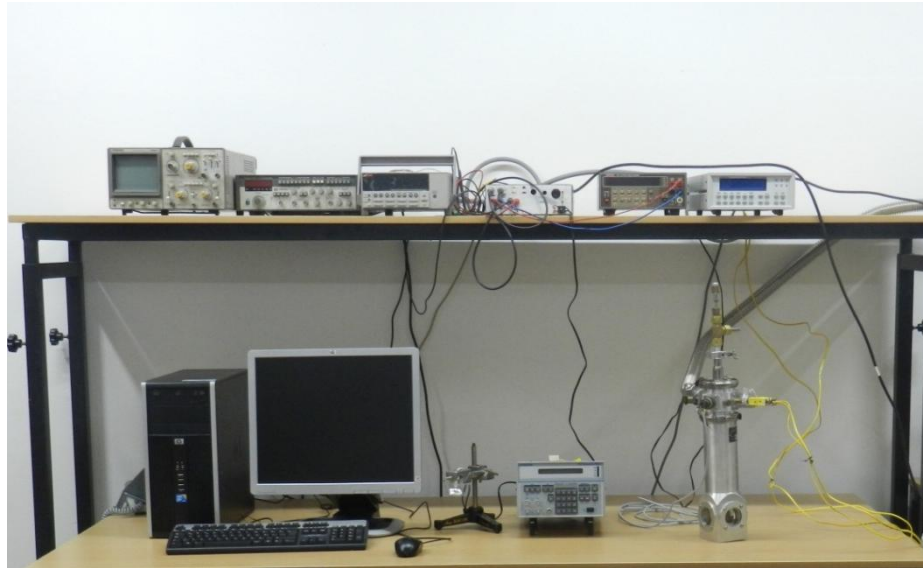
$$\alpha = \ln(T)/d \quad (4.10)$$

Burada T optik geçirgenlik, d ise örneğin kalınlığıdır. $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafiğinin enerji eksenini kestiği nokta malzemenin yasak band aralığı değerini vermektedir.

4.5 I-V Karakteristiklerinin Ölçümü ve Parametrelerin Belirlenmesi

Hazırlanan Al/Al₂O₃/CdS MIS yapısının akım gerilim ölçümleri, karanlıkta, çeşitli sıcaklıklarda ve farklı nem değerlerinde gerçekleştirildi. Ölçümlerde 1 fA hassasiyetli ve 1000 V DC çıkışa sahip Keithley 6517A elektrometre ile 1 μ V hassasiyete sahip Keithley 199 multimetre kullanıldı. Sıcaklık kontrolü Lakeshore 331, nem kontrolü ise Extech Hygro-Thermometer ile sağlandı.

Akım gerilim ölçümlerinden n idealite faktörü, ϕ_B bariyer yüksekliği, R_s seri direnci ve I_s doyma akımı hesaplandı. Hesaplamalarda Cheung tarafından 1986 yılında sunulan model kullanıldı.



Şekil 24 Akım Gerilim Ölçümleri için Kullanılan Deney Seti

Hazırlanan MIS yapının ile R_s direnci ve n idealite faktörünü hesaplamak için eklem üzerinden geçen akım yoğunluğu ifadesini yazarsak [7],

$$J = A^* T^2 \exp(q(V - IR_s)/nkT) \cdot \exp(-q\phi_B/kT) \quad (4.11)$$

Gerilim, akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olacak şekilde tekrar yazılırsa;

$$V = \frac{n}{\beta} \ln(J/A^* T^2) + JR_s A + n\phi_B \quad (4.12)$$

Burada A etkin alan ve $\beta=q/kT$ 'dir. Denklem (4.12) 'nin akım yoğunluğuna bağlı türevi alınır;

$$\frac{dV}{d\ln(J)} = \frac{n}{\beta} + R_s A J \quad (4.13)$$

doğru denklemi elde edilir. $dV/d\ln(J) - J$ grafiğiyle elde edilen doğru denkleminin yardımıyla R_s 'yi, $J=0$ 'da doğrunun eksenini kestiği noktayla ise n idealite faktörü hesaplanır.

$H(J)$ fonksiyonunun ϕ_B bariyer yüksekliği cinsinden ifadesi,

$$H(J) = n\phi_B + R_s A J \quad (4.14)$$

$H(J) - J$ grafiği grafiği çizilerek elde edilen doğrunun eğimiyle R_s , $J=0$ 'da doğrunun eksenini kestiği noktanın bulunmasıyla bariyer yüksekliği hesaplanır [18].

İdealite faktörünün gerilimle değişimi denklem (4.15)'te verilmiştir.

$$\phi_e = \phi_B + \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right) (V - IR_s) \quad (4.15)$$

Denklem (4.15) kullanılarak bariyer yüksekliğinin etkin değeri hesaplanır.

Yarıiletkenin iletkenlik bandı tabanı ile arayüzey durumlarının enerjileri (E_{ss}) arasındaki fark,

$$E_c - E_{ss} = q(\phi_e - (V - IR_s)) \quad (4.16)$$

denklemleri bulunur. Arayüzey durum yoğunluğu ise,

$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{d} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{w_D} \right] \quad (4.17)$$

ifadesiyle verilir.

$N_{ss} - (E_c - E_{ss})$ grafiği ile arayüzey durum yoğunluğu hakkında bilgi sahibi olunabilir.

4.6 C-V Karakteristiklerinin Ölçümü ve Parametrelerin Belirlenmesi

MIS yapıda yalıtkan tabakanın önemli bir özelliği de dielektrik özelliğe sahip olmasıdır. Bu dielektrik özellikten dolayı bu yapılar, paralel levhalı bir kondansatöre benzemektedir [35]. C-V ve C-f ölçümleri Novocontrol Alpha-A dielektrik spektroskopisi cihazı gerçekleştirildi.

Kapasitenin gerilime bağlı ifadesi,

$$C = \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 q A N_A}{2(V_d + V)}} \quad (4.18)$$

Burada A kontak alanı, V_d diyot üzerindeki gerilim ve N_A ise taşıyıcı yoğunluğudur. Kapasite değerini tekrar düzenlersek,

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_s \epsilon_0 q A N_A} \quad (4.19)$$

ifadesi elde edilir. $C^{-2} - V$ eğrisinin eğiminden taşıyıcı yoğunluğunu hesaplamak için denklem (4.19)'un türevi alınır,

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 q A N_A} \quad (4.20)$$

şeklinde ifade edilir. Arınma bölgesinin genişliği W_D ise,

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0}{q N_A}} \phi_s \quad (4.21)$$

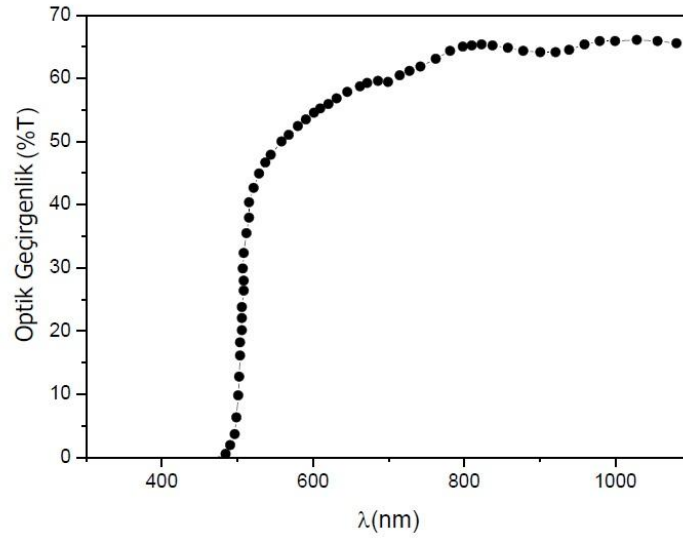
ifadesi ile bulunur [5] [15].

BÖLÜM 5

BULGULAR

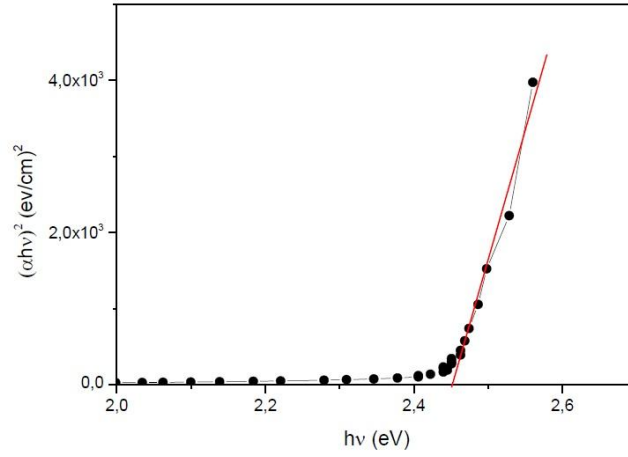
5.1 CdS Filmlerin Optik Özellikleri

300-1100 nm arasında optik ölçümleri gerçekleştirilen CdS filmlerin, dalga boyuna bağlı geçirgenlik grafiği Şekil 25 'te gösterilmiştir.



Şekil 25 CdS filmin optik geçirgenlik spektrumu

Direkt band geçişli CdS filmin soğurma katsayısının enerjiye bağlı grafiği Şekil 26 'da verilmiştir.

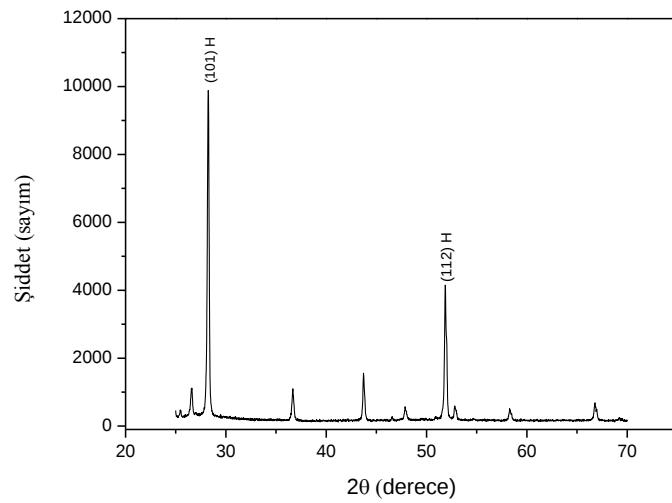


Şekil 26 Optik geçirgenlik sonucu elde edilen $(\alpha h\nu)^2$ değerinin enerjiye bağlı değişimi

Şekil 26'dan da görüldüğü üzere grafiğin uzantısının enerji eksenini kestiği nokta ile CdS filmlerin yasak band aralığı 2,42 eV olarak hesaplandı.

5.2 CdS Filmlerin Yapısal Özellikleri

CdS filmlerin kristal yapısının incelenmesi XRD analizi ile geręekleştirildi. XRD sonucunda elde edilen piklerin hegzagonal yapıya sahip CdS'e ait olduğu anlaşılmaktadır. Görülen pikler (101) ve (112) düzlemlerine ait olduğu belirlendi [36] [37].



Şekil 27 CdS filmin XRD analizi

Şekil 27’de görülen pikler denklem (5.1) ve (5.2) kullanılarak düzlemler arası uzaklık ve örgü parametreleri hesaplandı.

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (5.1)$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (5.2)$$

Kristal düzlemine bağlı olarak düzlemler arası uzaklık değerleri düzlem (101) için 3,160 Å düzlem (112) için 1,764 Å bulundu. Örgü parametreleri ise a=4,102 Å ve c=6,919 Å olarak hesaplandı. Yapıya ait parçacık boyutları (101) düzlemi için 42,85 nm ve (112) düzlemi için 46,58 nm olarak hesaplandı.

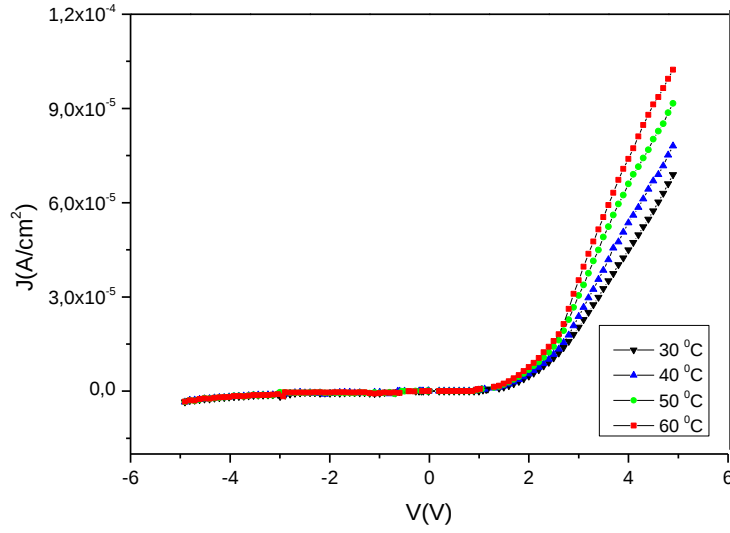
5.3 Elektriksel Özellikler

Al/Al₂O₃/CdS eklemlerin GaIn kontak alınarak elektriksel ölçümleri yapıldı. Bu bölümde I-V-T, C-V-T ve C-f ölçümlerine ait grafikler verilmiştir.

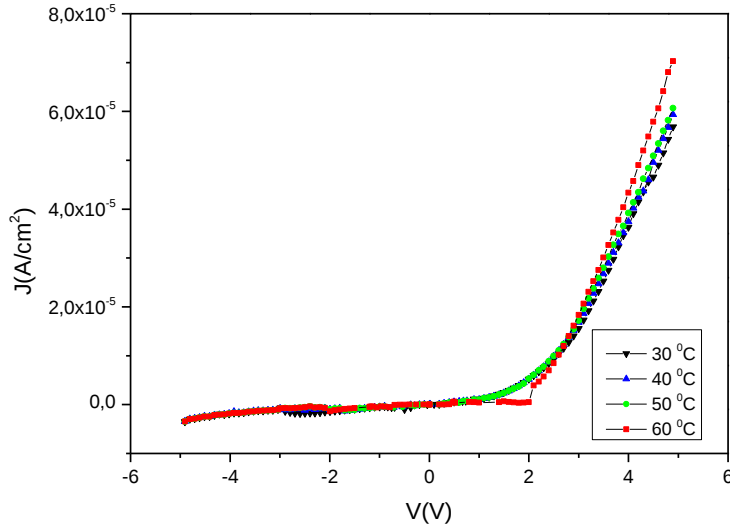
I-V ölçümleri hava ve %30-%70 nem değerleri arasında karanlıkta gerçekleştirildi. I-V-T ölçümleri ise oda sıcaklığı ve 60°C aralığında alındı. C-V ve C-f ölçümleri azot ortamında ve karanlıkta gerçekleştirildi. C-V-T karakteristikleri oda sıcaklığı ile 60°C aralığında gerçekleştirildi.

5.3.1 I-V Ölçümlerinden Elde Edilen Sonuçlar

Al/Al₂O₃/CdS eklemin GaIn kontak alınarak 60 ve 65 mikron kalınlıklarındaki Al₂O₃ tabakasını 30 °C ile 60 °C aralığındaki J-V grafikleri Şekil 28’de ve Şekil 29’da verilmiştir.

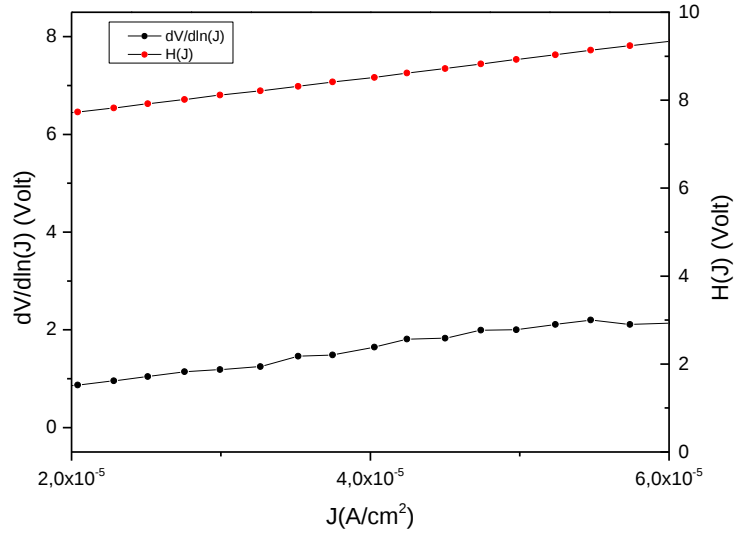


Şekil 28 60 mikron kalınlıklı Al/Al₂O₃/CdS yapısının sıcaklığa bağlı J-V grafiği

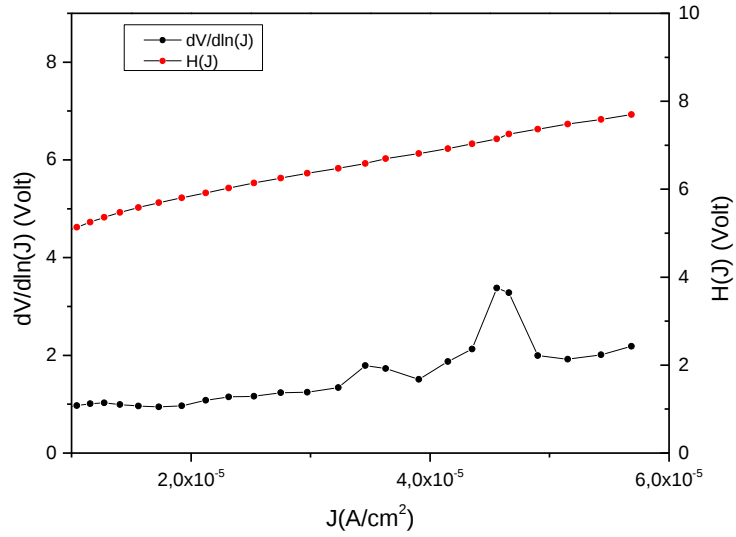


Şekil 29 65 mikron kalınlıklı Al/Al₂O₃/CdS yapısının sıcaklığa bağlı J-V grafiği

Şekil 28 ve Şekil 29’da J-V grafikleri verilen Al/Al₂O₃/CdS MIS yapısının akım-gerilim ölçümleri (-5V, +5V) aralığında gerçekleştirildi. İleri beslem durumunda akım değerlerinde düzenli bir artış görüldü. Ters beslem durumunda ise akım engellenmiştir. Sıcaklık etkisiyle I-V karakteristiklerinde düzenli bir değişim meydana gelip, akım değerleri artmıştır.



Şekil 30 60 mikron kalınlıklı Al/Al₂O₃/CdS yapısının $dV/d\ln(J)$ ve $H(J)$ -J grafiği
 Şekil 30'da ve Şekil 31'de MIS yapının 30 °C'de $dV/d\ln(J)$ ve $H(J)$ -J grafikleri verilmiştir.



Şekil 31 65 mikron kalınlıklı Al/Al₂O₃/CdS yapısının $dV/d\ln(J)$ ve $H(J)$ -J grafiği
 Denklem (4.13) ve (4.14) kullanılarak hesaplanan n , ϕ_B ve R_s değerleri Çizelge 3 ve Çizelge 4'te verilmiştir.

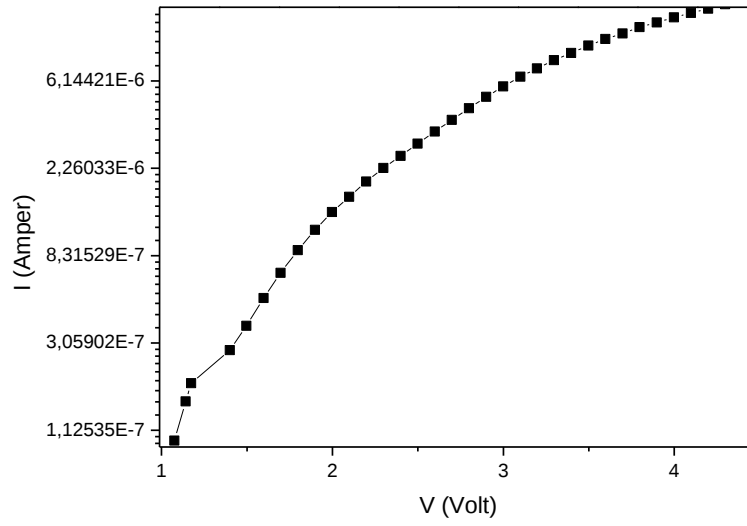
Çizelge 3 60 mikron kalınlıklı Al/Al₂O₃/CdS yapısının parametreleri

T (°C)	dV/dln(J) - J		H(J) - J	
	n	R _s (Ω)	Φ _B (eV)	R _s (Ω)
30	5,685	5,2x10 ⁵	0,98	5,67x10 ⁵
40	6,111	4,46x10 ⁵	0,93	4,30x10 ⁵
50	6,459	3,24x10 ⁵	0,88	3,32x10 ⁵
60	6,498	3,09x10 ⁵	0,87	3,06x10 ⁵

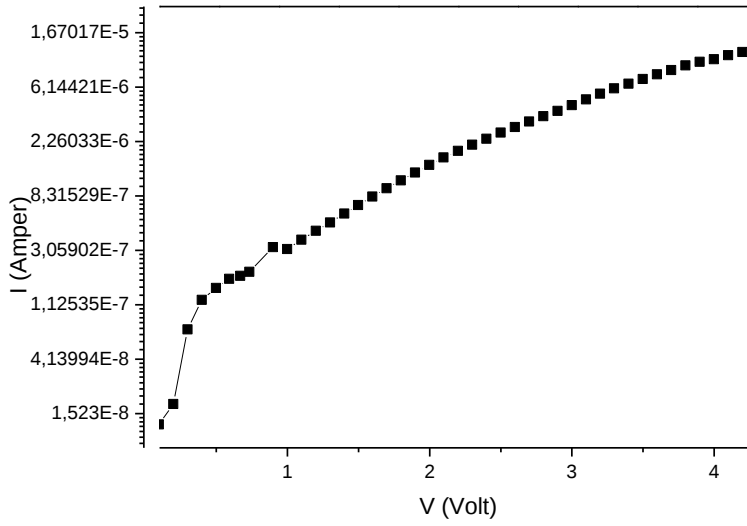
Çizelge 4 65 mikron kalınlıklı Al/Al₂O₃/CdS yapısının parametreleri

T (°C)	dV/dln(J) - J		H(J) - J	
	n	R _s (Ω)	Φ _B (eV)	R _s (Ω)
30	6,343	5,8x10 ⁵	0,92	5,92x10 ⁵
40	8,432	5,61x10 ⁵	0,69	5,74x10 ⁵
50	8,703	5,60x10 ⁵	0,66	5,68x10 ⁵
60	9,592	4,50x10 ⁵	0,62	4,65x10 ⁵

Çizelge 3 ve Çizelge 4 ‘ten de görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça seri direncin azaldığı görülmüştür. İdealite faktörünün çok fazla değişim göstermemesi oksit tabakanın oldukça kalın olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca sıcaklığın artmasıyla bariyer yüksekliğinin de azaldığı görülmektedir.



Şekil 32 60 mikron kalınlık için Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun pozitif beslem bölgesinde ln(I) - V grafiği



Şekil 33 65 mikron kalınlık için Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun pozitif beslem bölgesinde ln(I) - V grafiği

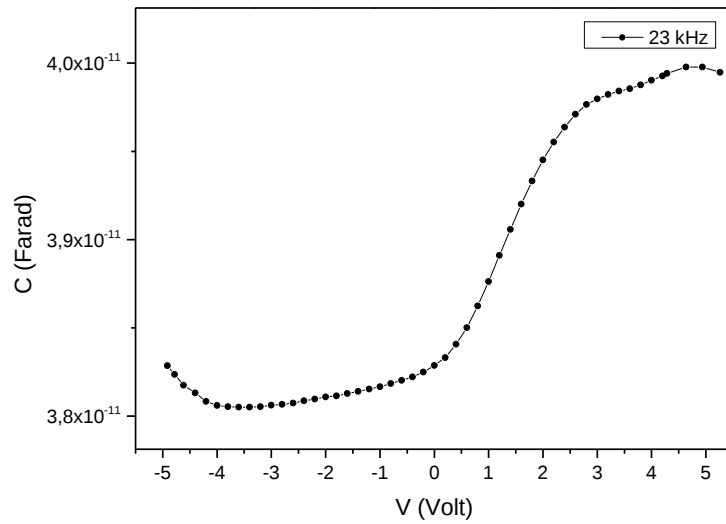
Şekil 32 ve Şekil 33 ile diyotların doyma akımları (I_0) grafiğin doğrusal kısmı ile belirlendi. I_0 'ın sıcaklıkla ve kalınlıkla değişimi Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5 Sıcaklığa ve kalınlığa bağlı doyma akımları

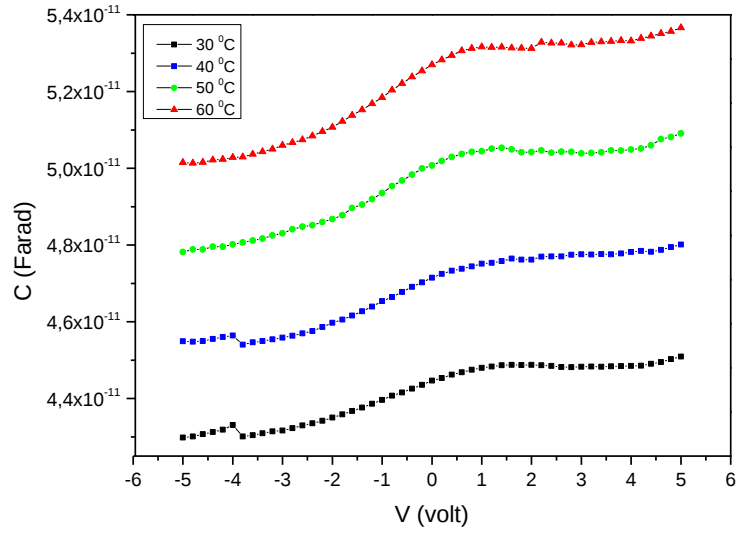
T (°C)	I ₀ (Amper)	
	60 mikron	65 mikron
30	1,43431E-8	2,83114E-8
40	1,27541E-9	5,99353E-8
50	1,05744E-10	5,36921E-8
60	1,34427E-10	6,00905E-9

5.3.2 C-V Ölçümlerinden Elde Edilen Sonuçlar

Farklı oksit tabaka kalınlıklarına sahip Al/Al₂O₃/CdS diyotlarının -5V, +5V aralığında C-V ölçümleri gerçekleştirildi.

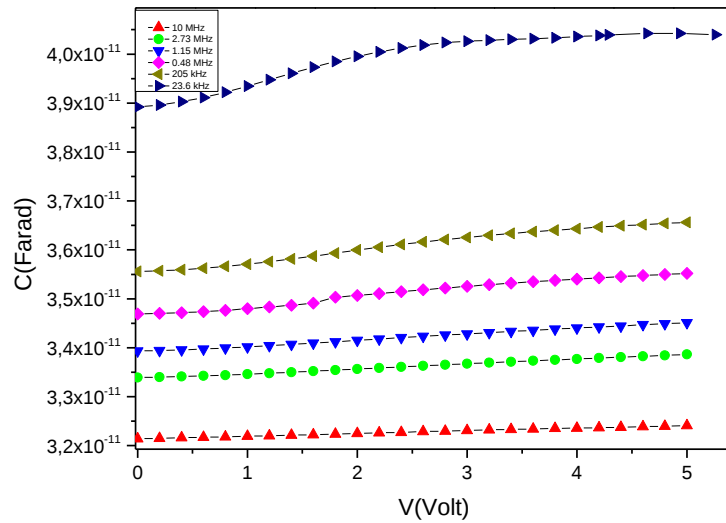


Şekil 34 Al/Al₂O₃/CdS yapısının 23 kHz'de C-V grafiği



Şekil 35 60 mikron kalınlık için Al/Al₂O₃/CdS yapısının 23 kHz'de sıcaklığa bağlı C-V grafiği

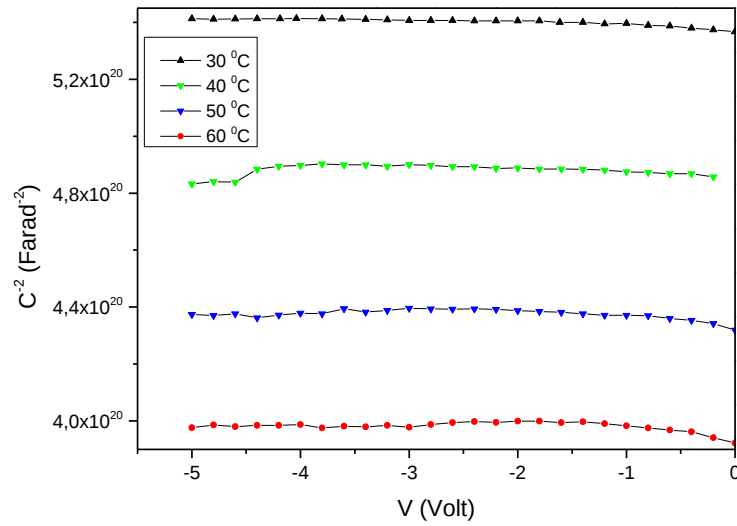
Şekil 35'te görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça kapasite değeri artmıştır. Sıcaklık etkisiyle yalıtkan içerisinde bulunan iyonik yükler artar. Bu iyonik yüklerin kapasiteye katkıda bulunması sonucu sıcaklık etkisiyle kapasite değerlerinde artış gözlemlenmiştir.



Şekil 36 60 mikron kalınlık için Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun C-V karakteristiğinin frekans ile değişimi

Şekil 36’da 60 mikron kalınlık için Al/Al₂O₃/CdS diyotun 23.6 kHz ile 10 MHz arasındaki C-V karakteristiği görülmektedir. Düşük frekanslardan yüksek frekanslara gidildikçe kapasite değerlerinde azalma görülmektedir. Bunun nedeni düşük frekanslarda arayüzey yüklerinin ac sinyali takip edebiliyor olmasıdır. Bu nedenle kapasite davranışının arayüzey yüklerinin durumuna da bağlı olduğu anlaşılmıştır [21].

Al/Al₂O₃/CdS diyotu için 1/C²-V grafiği Şekil 37’de verilmiştir. Farklı kalınlıklarda oksit tabakalar üzerine kaplanan CdS için taşıyıcı yoğunluğu C-V ölçümlerinden elde edilmiş ve Çizelge 6’da verilmiştir.



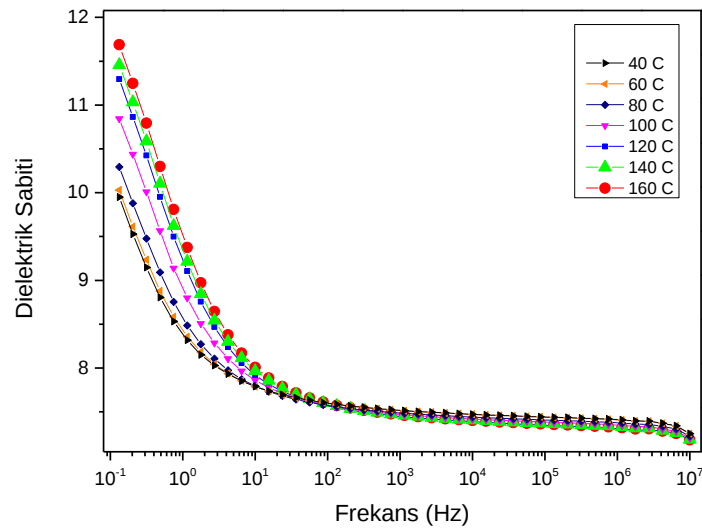
Şekil 37 60 mikron kalınlık için Al/Al₂O₃/CdS diyotun C-V karakteristiğinden elde edilen 1/C₂-V grafiği

Çizelge 6 Al/Al₂O₃/CdS diyotlar ile hesaplanan taşıyıcı yoğunluğu değerleri

T (°C)	N _d (cm ⁻³) x 10 ¹³	
	60 mikron	65 mikron
30	7,21	2,05
40	6,06	1,57
50	5,49	1,30
60	4,84	1,28

5.3.3 C-f Ölçümleri

MIS diyotta yalıtkan malzeme olarak kullanılan Al₂O₃'ün farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı kapasite ölçümleri yapıldı. Bu ölçümlerden faydalanarak yalıtkan malzemenin dielektrik sabitinin frekans ve sıcaklığa bağlı değişimleri incelendi.

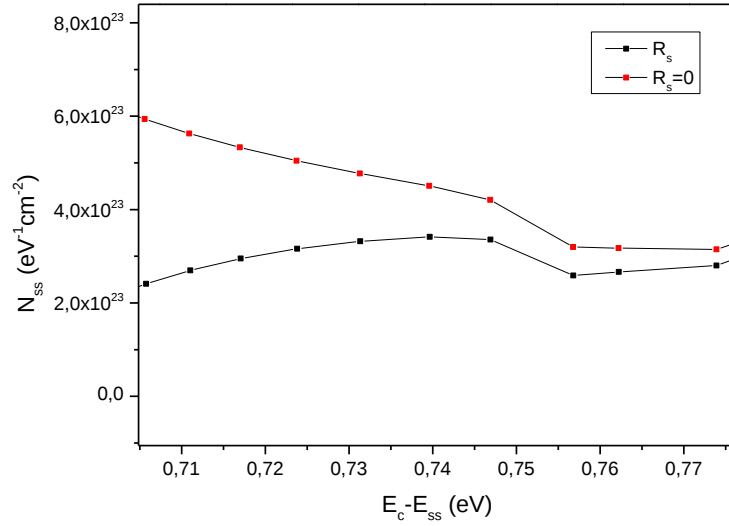


Şekil 38 Al₂O₃'ün C-f karakteristiği

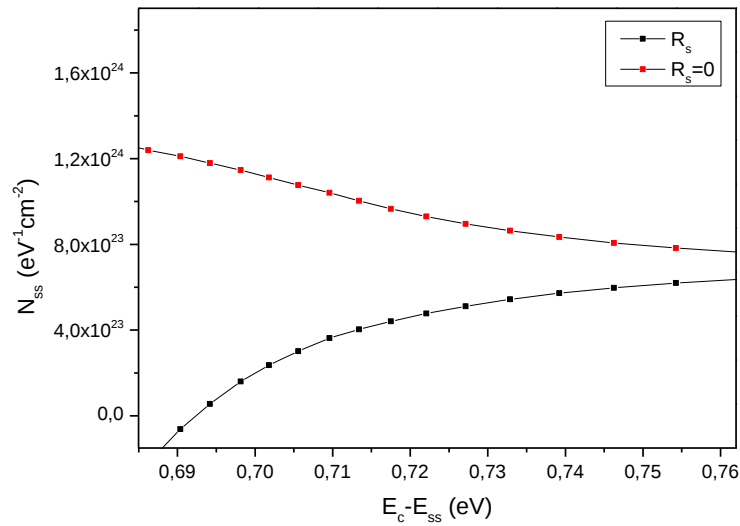
Şekil 38 'de Al₂O₃ 'ün 40 °C ile 160 °C arasında ölçülen C-f karakteristiği verilmiştir. 20 °C'lik artışlarla gerçekleştirilen ölçümlerde dielektrik sabitinin sıcaklıkla düzenli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Düşük frekanslarda dielektrik sabiti frekansa bağlı iken yüksek frekanslara çıkıldığında frekanstan bağımsız olarak hareket eder.

5.3.4 Arayüzey Durum Yoğunluğu

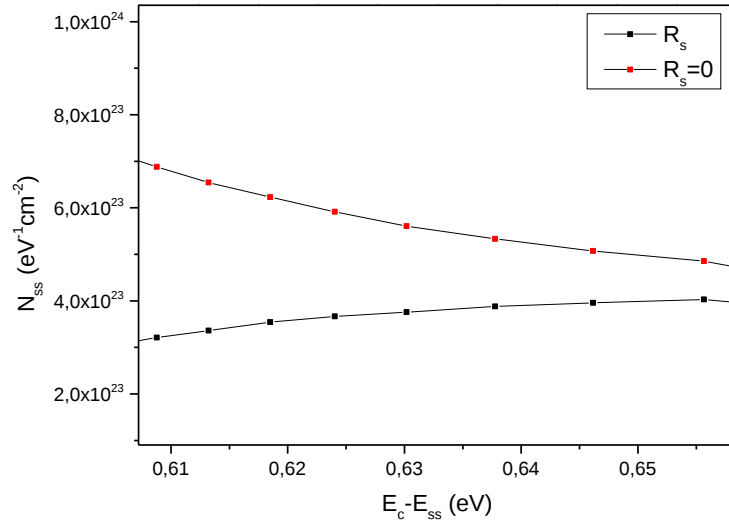
Arayüzey durumlarının I-V, C-V ve C-f karakteristiklerine etkisini incelemek için Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun ileri yöndeki I-V ölçümlerinden faydalanarak arayüzey durum yoğunluğunun (N_{ss}) E_c-E_{ss} 'nin fonksiyonu olarak değişimleri incelendi.



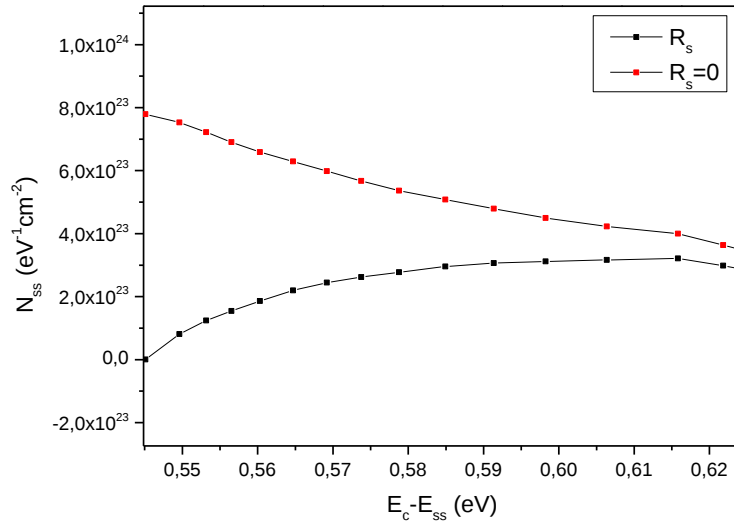
Şekil 39 60 mikron kalınlık için Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun 30 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi



Şekil 40 60 mikron kalınlık için Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun 40 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi

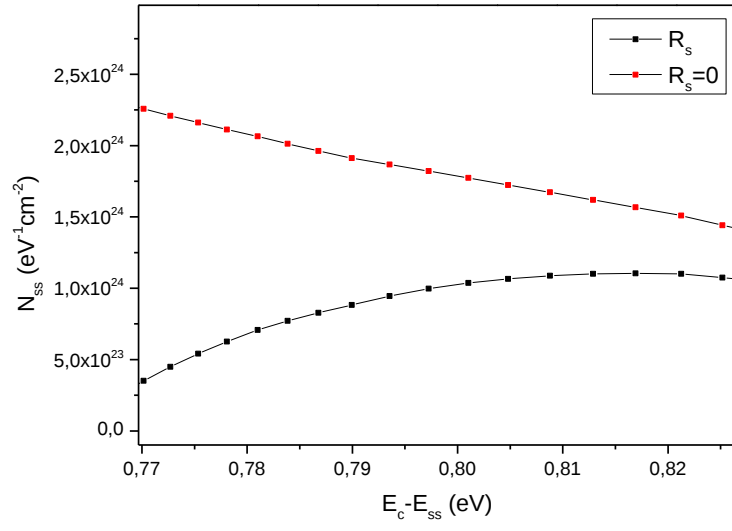


Şekil 41 60 mikron kalınlık için Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun 50 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi

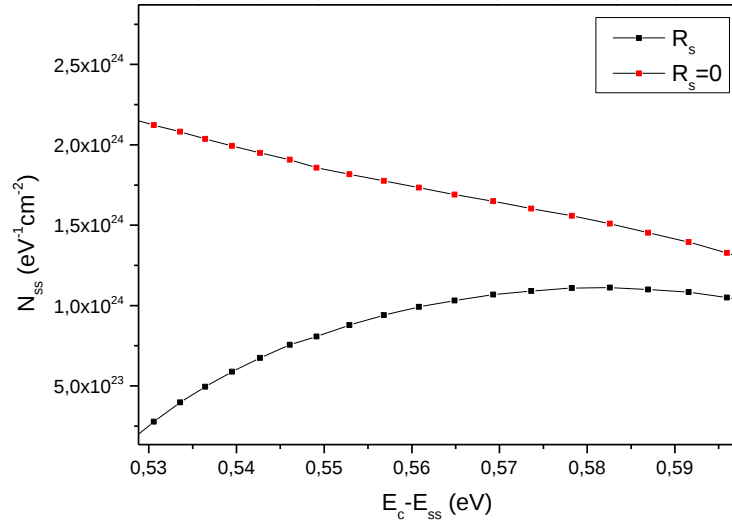


Şekil 42 60 mikron kalınlık için Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun 60 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi

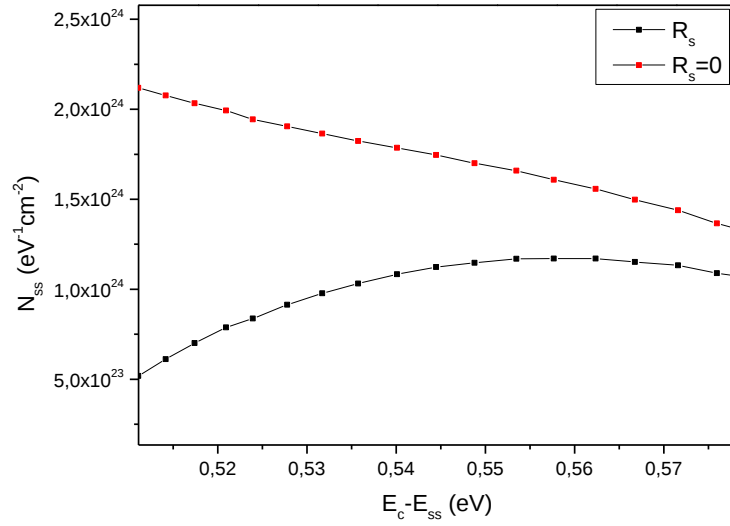
Şekil 39 – Şekil 42 ‘de verilen grafikler 60 mikron kalınlıklı oksit tabakaya sahip Al/Al₂O₃/CdS MIS diyota ait arayüzey durumlarını farklı sıcaklık değerlerinde göstermektedir. Yapıya ait en düşük durum yoğunluğu $N_{ss} = 3,766 \times 10^{22} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olarak bulunmuştur. Sıcaklık artışı ile arayüzey yükleri yarıiletkenin iletim bandının daha üst seviyelerine doğru kaymaktadır.



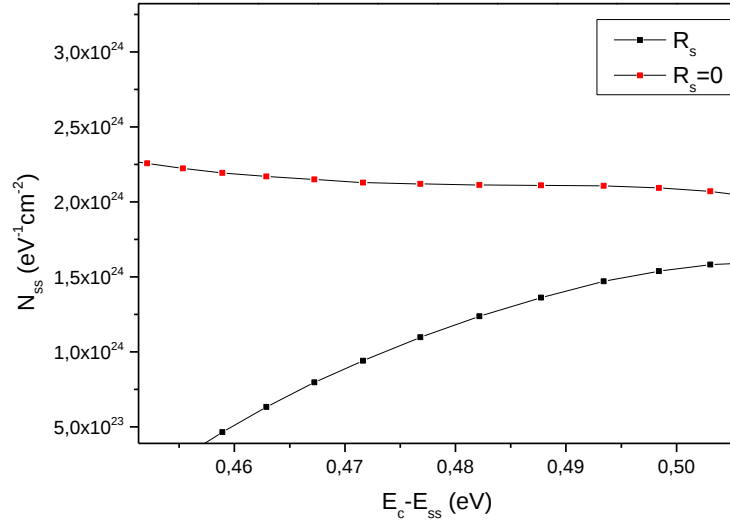
Şekil 43 65 mikron kalınlık için Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun 30 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi



Şekil 44 65 mikron kalınlık için Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun 40 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi



Şekil 45 65 mikron kalınlık için Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun 50 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi



Şekil 46 65 mikron kalınlık için Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun 60 °C' de arayüzey durum yoğunluğunun enerji ile değişimi

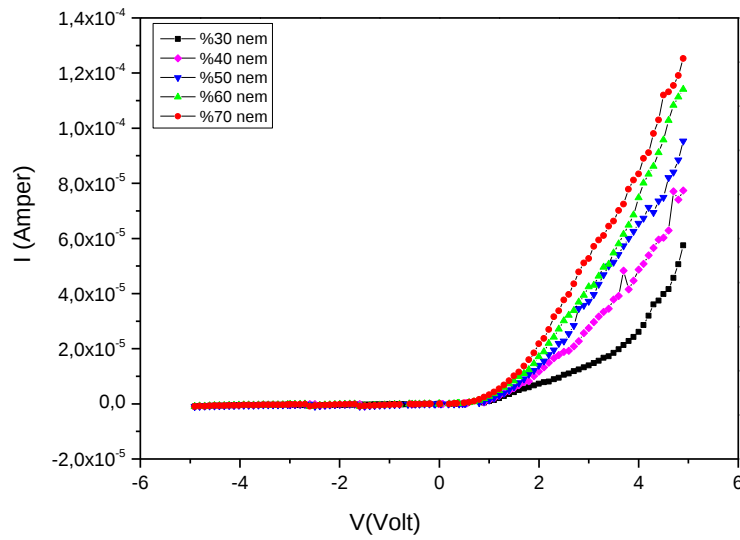
Şekil 43 – Şekil 45 ‘de verilen grafikler 65 mikron kalınlıklı oksit tabakaya sahip Al/Al₂O₃/CdS MIS diyota ait arayüzey durumlarını farklı sıcaklık değerlerinde göstermektedir. Yapıya ait en düşük durum yoğunluğu $N_{ss} = 4,629 \times 10^{22} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olarak bulunmuştur. 60 mikron kalınlığa sahip MIS diyotun davranışına benzer bir şekilde

sıcaklık artışı ile arayüzey yükleri yarıiletkenin iletim bandının daha üst seviyelerine doğru kaymaktadır.

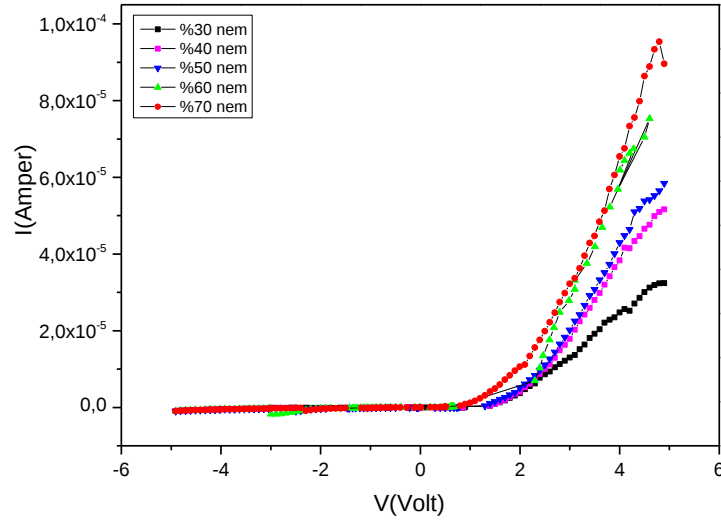
$N_{ss} - E_c - E_{ss}$ grafiklerinden de görüldüğü gibi arayüzey durumlarının yoğunluğunda oksit tabakanın kalınlığına bağlı olarak belirgin bir değişim gözlenmemiştir.

5.3.5 Sensör Uygulamaları

Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun sabit sıcaklık ve sabit gerilim altında nem duyarlılığı incelendi. 60 mikron ve 65 mikron kalınlıklı oksit tabakaya sahip Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun neme bağlı I-V karakteristikleri Şekil 47 ve Şekil 48’de verilmiştir.



Şekil 47 60 mikron kalınlıklı oksit tabakaya sahip Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun neme bağlı I-V karakteristiği



Şekil 48 65 mikron kalınlıklı oksit tabakaya sahip Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun neme bağlı I-V karakteristiği

Şekil 47 ve Şekil 48’de görüldüğü gibi artan nem değerleriyle Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotun ileri beslem durumunda akım değerlerinde hızlı bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışın nedeni oksit tabakanın neme duyarlı olmasından kaynaklanmaktadır. Grafiklerden de anlaşıldığı üzere Al/Al₂O₃/CdS MIS diyotu nem sensörü özelliği göstermektedir.

Nem etkisiyle MIS diyotun parametrelerindeki değişim Çizelge 7’de gösterilmektedir.

Çizelge 7 60 mikron kalınlıklı oksit tabakaya sahip MIS diyotun parametrelerinin ortam şartlarına bağılı değışimi

	dV/dln(J) - J		H(J) - J	
nem (%)	n	R _s (Ω)	Φ _B (eV)	R _s (Ω)
30	4,68	1,5x10 ⁵	0,85	1,23x10 ⁵
40	5,26	5,44x10 ⁴	0,85	5,31x10 ⁴
50	4,83	5,35x10 ⁴	0,85	5,27x10 ⁴
60	5,56	5,06x10 ⁴	0,80	4,81x10 ⁴
70	4,95	5,00x10 ⁴	0,81	4,37x10 ⁴

Çizelge 8 65 mikron kalınlıklı oksit tabakaya sahip MIS diyotun parametrelerinin ortam şartlarına bağılı değışimi

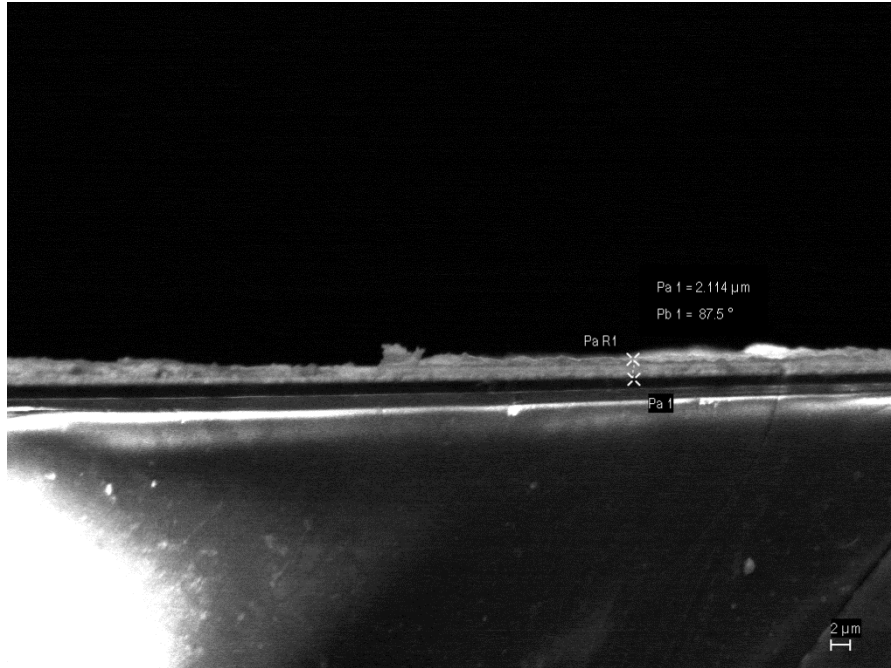
	dV/dln(J) - J		H(J) - J	
nem (%)	n	R _s (Ω)	Φ _B (eV)	R _s (Ω)
30	5,10	1,03x10 ⁵	0,70	1,10x10 ⁵
40	4,83	9,27x10 ⁴	0,90	9,31x10 ⁴
50	5,53	6,67x10 ⁴	0,91	6,78x10 ⁴
60	6,07	2,88x10 ⁴	0,85	3,51x10 ⁴
70	11,21	2,86x10 ⁴	0,78	2,43x10 ⁴

Ortamda bulunan nemin etkisiyle seri direnç değerlerinde belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Bariyer yüksekliğinin ise nem etkisiyle çok fazla değişime uğradığı söylenememektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada alüminyum yüzeyinde anodik oksidasyon metoduyla oluşturulan Al_2O_3 üzerine spreylendirme yöntemiyle CdS kaplanarak oluşturulan MIS diyotun karakteristik parametrelerinin belirlenmesi ve buna bağlı olarak uygulama alanlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır.

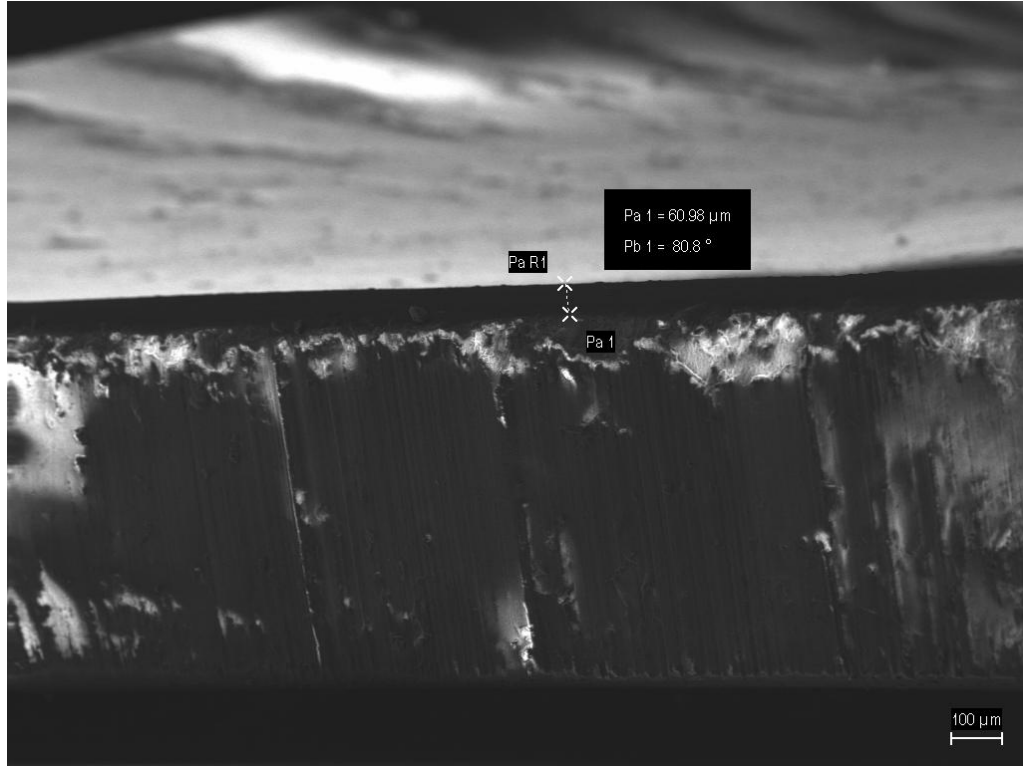
Spreylendirme yöntemi ile üretilen CdS filmlerin optik geçirgenlik ölçümleri yapılarak yasak band aralığı $E_g=2,42$ eV olarak hesaplandı. Filmlerin öz direnci ise Van der Pauw yöntemi kullanılarak $2,01 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ olarak belirlendi. Film kalınlığının belirlenmek için SEM ölçümü yapıldı ve CdS tabakanın kalınlığı $2,114 \mu\text{m}$ olarak bulundu. Hall ölçümleri ile taşıyıcı yoğunluğu $1,974 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplandı.



Şekil 49 CdS filmin yan kesit SEM görüntüsü

XRD analizi ile CdS filmlerin (101) ve (112) düzlemlerine sahip olduğu görüldü. Kristalin düzlemleri arası uzaklık sırası ile 3,160 Å ve 1,764 Å olarak hesaplandı. Örneklerin parçacık boyutları her iki düzlem için de hesaplandı ve sırası ile 42,85nm ve 46,58nm bulundu. Hekzagonal yapıya sahip kristalin örgü parametreleri $a=4,102$ Å ve $c=6,919$ Å olarak bulundu. CdS için x-ışını kırınım analizi ile benzer sonuçlar diğer literatürde de görülmektedir [36] [38] [39].

Al_2O_3 tabakasının kalınlığını belirlemek için SEM ölçümü yapılmıştır.



Şekil 50 Al_2O_3 tabakasının yan kesit SEM görüntüsü

Al/ Al_2O_3 /CdS eklemi üzerine kontak metali olarak damlatma yöntemiyle GaIn kaplandı.

Sıcaklığa bağlı akım gerilim ölçümleriyle diyotların idealite faktörleri hesaplandı. 60 mikron oksit tabaka kalınlığına sahip MIS diyot için idealite faktörü oda sıcaklığında $n=5,685$ bulunmuştur. Sıcaklık artışıyla birlikte idealite faktöründe çok fazla bir değişim gözlenmemiştir. 65 mikron oksit tabaka kalınlığına sahip MIS diyot için idealite faktörü ise $n=6,343$ bulunmuştur. Yine sıcaklık artışıyla birlikte idealite faktöründe çok fazla bir değişim gözlenmemiştir. Bunun nedeni oksit tabaka

kalınlığının bir hayli fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Oksit tabakanın daha ince olması durumunda diyotun ideale daha yakın olması literatürde görülmüştür [40]. Sıcaklık artışı ile farklı kalınlıklı oksit tabakalara sahip Al/Al₂O₃/CdS diyotun idealite faktörü, seri direnç ve bariyer yüksekliği değerlerinde değişimler gözlemlenmiştir. H(J)-J ve dV/dln(J)-J grafikleri yardımıyla elde edilen R_s seri direnç değerleri birbirleriyle tutarlı sonuçlar vermiştir.

Sıcaklıkla değişen C-V ölçümleri yapıldı. Bu ölçümler yardımıyla taşıyıcı yoğunlukları hesaplandı. İncelenen sıcaklık değerleri arasında taşıyıcı yoğunluğu değerlerinde belirgin bir değişim gözlenmedi. Sabit sıcaklıkta frekansa bağlı kapasitans ölçümleri yapıldı. Düşük frekanslardan yüksek frekanslara gidildikçe kapasite değerinde azalma olduğu görüldü. Kapasite değerinin azalmasına neden olarak arayüzey yüklerinin ac sinyalinin düşük frekanslarda izleyebilmesi gösterilebilir [41].

Arayüzey durum yoğunluğu farklı oksit tabaka kalınlıklarına sahip MIS diyotlar için incelendi. Her iki kalınlıkta arayüzey durum yoğunluğu değeri $N_{ss} \approx 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ mertebesinde bulundu. Hesaplanan arayüzey durum yoğunluğu oldukça büyük değerlerdir. Bunun nedeni kullanılan yarıiletkenin yüzeyinde kusurlar olması, oksit tabakayla arasındaki geçişlerin homojen olmaması gösterilebilir. Arayüzey durum yoğunluğu hesabında seri direnç etkisinin göz önüne alındığı ve alınmadığı sonuçlardan elde edilen grafiklerden seri direncin belirleyici bir etkisi olduğu görülmüştür. Yarıiletkenin tabanından daha alt enerjilere inildikçe bu iki değer birbirine uzaksamaktadır. Benzer sonuçlar literatürde bulunmaktadır [42].

MIS diyota farklı % nem değerleri uygulanarak neme duyarlılığı incelenmiştir. Farklı nem değerleri altında ölçülen I-V karakteristiklerinden görüldüğü gibi nem değeri arttıkça ileri beslem yönünde akım değerlerinde bir artma görülmüştür. Hesaplanan parametreler sonucunda diyotun R_s seri direncinde azalma meydana gelmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Okutan, M. ve Yakuphanoglu, F., (2007), "Analysis of interface states and series resistance of Ag/SiO₂/n-Si MIS Schottky diode using current-voltage and impedance spectroscopy methods", *Microelectronic Engineering*, 85: 646-653
- [2] Demirezen, S., Sönmez, Z., Aydemir, U. ve Altındal Ş., (2011), "Effect of series resistance and interface states on the I-V, C-V G/w-V characteristics in Au/Bi-doped polyvinyl alcohol (PVA)/n-Si Schottky barrier diodes at room temperature", *Current Applied Physics*, 12: 1-7
- [3] Altıntaş, H., Altındal, S., Shtrikman, H. ve Özçelik S., (2009), "A detailed study of current-voltage characteristics in Au/SiO₂/n-GaAs in wide temperature range", *Microelectronics Reliability*, 49: 904-911
- [4] Shamala, K.S., Murthy, L.C.S., Radhakrishna, M.C. ve Narasimha Rao K., (2006), "Characterization of Al₂O₃ thin films prepared by spray pyrolysis method for humidity sensor", *Sensors and Actuators*, 135: 552-557
- [5] S.M.Sze ve Ng, Kwok K., (2007), *Physics of Semiconductor Devices*. 3. New Jersey : John Wiley & Sons
- [6] Lidia Ł., Andrzej J., (2010), *History of Semiconductors*. Journal of Telecommunication and Information Technology, 1: 3-5
- [7] Rhoderick, E.H., (1982), "Metal-semiconductor contacts" Manchester : IEEE, *Solid-State and Electron Devices*, 129
- [8] Schiek, B., Marquardt, J. ve Helmcke, J., (1969), *Physical Behaviour and Technical Applications of Metal-Insulator Semiconductor Varactors*, London : IEEE, 520 - 523.
- [9] Caferov, T., (2000), *Yarıiletkenler, Katıhal Elektroniği*, İstanbul : YTÜVAK
- [10] Caferov, T., (1998), *Yarıiletken Fiziği*, İstanbul : Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, 975-461-132-7
- [11] Yacobi, B.G., (2003) *Basic Properties of Semiconductors*, New York : Kluwer Academic
- [12] Millman, J., (1987), Grabel, A. *Microelectronics*, New York : Mc Graw Hill
- [13] Rutkowski, G.B., (1988), *Solid State Electronics*, New : Macmillan Publishing Comp.

- [14] Uğur, N., (2005), Metal/Yalıtkan/n-GaAs Hidrojen Sensörlerinin Araştırılması ve Geliştirilmesi. İstanbul
- [15] Neamen, D. A., (2003), The Extrinsic Semiconductor, Semiconductor Physics And Devices 3rd ed., The McGraw- Hill,
- [16] Nicollian, E. H. Ve Brews, J. R., (1982), MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology. New York : John Wiley & Sons, 0471085006.
- [17] Streetman, B. G. ve Banerjee, S.K., (2009), Solid State Electronic Devices. Yeni Delhi : PHI Learning, 9788120330207.
- [18] Schroder, D. K., (2006), Semiconductor Material and Device Characterization. New Jersey : John Wiley & Sons, 0471739065.
- [19] Simmons, J.G., (1971), Conduction in thin dielectric films, Journal of Physics D: Applied Physics, 4:1
- [20] Harrell, W.R. ve Frey, J., (1999), "Observation of Poole Frenkel effect saturation in SiO₂ and other insulating films", Thin Solid Films, 352: 195-204
- [21] Kuruoğlu, F., (2012), Metal/Poliarilat/CdS/ITO İnce Film Hibrit Eklemlerin Yapısal, Elektrik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi. YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul
- [22] Gedik, D., (2008), Aluminyum Yüzeyindeki Oksit Tabakanın Sodyum Dikromat ve Sülfirik Asit Anodizing Yöntemiyle Geliştirilmesi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana
- [23] Groves, J. F., (1998), Directed Vapor Deposition. The Faculty of the School of Engineering and Applied Science, University of Virginia
- [24] Martin, P. M., (2011), Introduction to Surface Engineering and Functionally Engineered Materials. New Jersey : John Wiley & Sons, 978-0-470-63927-6
- [25] Mattox, D. M., (2010), Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. Second edition. Burlington, MA : Elsevier Inc., 978-0-81-552037-5
- [26] Ashour, A., (2003), "Physical Properties of Spray Pyrolysed CdS Thin Films" Tübitak, 27: 551-558.
- [27] Özbaş, Ö., (1993), Spray Pyrolysis Yöntemiyle Elde Edilen CdS_xSe_{1-x} Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir
- [28] Suvüt, H. H., (2005), Değişik Yöntemlerle Elde Edilen CdS'ün Optik ve Elektriksel Özelliklerinin Karşılaştırılması, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir
- [29] Konuklu, S., (2007), Aluminyum Yüzeyindeki Oksit Tabakasının Sülfirik Asit Anodizing Yöntemiyle Geliştirilmesi Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana
- [30] Şişmanoğlu, T., (2009), Anodik Oksidasyon Yöntemiyle 2024, 6082 ve 7075 Kalite Aluminyum Alaşımlarının Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi, İstanbul

- [31] Rohan A., Yar-Ming W. ve Hong-Hsiang K., (2007), "Kinetics of the electrolytic coloring process on anodized aluminium", Journal of Applied Electrochemistry, 37, 291-296.
- [32] Alwitt, R. S., (2002), Anodizing, Northbrook, IL. USA : Boundary Technologies, Inc, 60065-0622.
- [33] Anodizing, <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/metals/8E.pdf> , (02.01.2013)
- [34] Yeşilkaya, S. S., (2004), CdS/CdTe Heteroeklemlerin Elektriksel ve Fotovoltaik Özellikleri, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul
- [35] Sönmezoğlu, S., Seçkin A., (2001), "Kapasitans-Voltaj (C-V) Yöntemiyle Sb Katkılı TiO₂ / n-Si MIS Yapının Seri Direnç Parametresinin Hesaplanması " Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, 11: 011101 (1-8).
- [36] Pawar M.J., Chaure S. S. (2009), "Synthesis of CdS Nanoparticles Using Glucose as a Capping Agent" , Laboratory of Materials Synthesis, 444602
- [37] Zhou S.M., Feng Y.S., Zhang L.D., (2002), "Sonochemical synthesis of large-scale single crystal CdS nanorods.", Yongzhou : Materials Letters, 57 2936 – 2939.
- [38] Raji P., Sanjeeviraja C. ve Ramachandran K., (2005), "Thermal and structural properties of spray pyrolysed CdS thin film", Bull. Mater. Sci. 28: 233-238
- [39] Narayanan, K. L., (1997) "Chemical bath deposition of CdS thin films and their partial conversion to CdO on annealing", Bull. Mater. Sci 20: 287-295
- [40] Tsang, W.M., Cameron, D.C. ve Duncan W., (1978), "Junctions Characteristics of Al-Al₂O₃-CdS Diodes Fabricated by Molecular Beam Epitaxy", Scotland : Department of Electronics and Electrical Engineering The University Glasgow, 85-30
- [41] Sağlam, M., (2008), "Calculation from the current–voltage and capacitance–voltage measurements of characteristics parameters of Cd/CdS/n-Si/Au–Sb structure with CdS interface layer grown on n-Si substrate by SILAR method" Microelectronic Engineering, 85: 1831–1835
- [42] Ebeoğlu, M. A., (2008), "Current–voltage characteristics of Au/GaN/GaAs structure", Physica B, 403: 61-66

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Muzaffer MOĞULKOÇ
Doğum Tarihi ve Yeri :23.06.1987 - İSTANBUL
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :muzaffermogulkoc@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Fizik	Trakya Üniversitesi	2009
Lise	Fen-Matematik	Otakçılar Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012	Yıldız Teknik Üniversitesi	Öğrenci Asistanı
2009	Küçükköy Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi	Fizik Öğretmeni

YAYINLARI

Makale

1. *“Electrical and thermodynamical characterization of thermotropic liquid crystal”*
F. Sesigür, D. Sakar, O. Yasa-Sahin, F. Kuruoglu, F. Cakar, M. Mogulkoc, M. Caliskan, O. Cankurtaran, M. Serin, B. Bılgın-Eran, , Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications, Vol 5 ISS.5 2011, 586 – 590 (June 2011)

Bildiri

1. “ Oxide layer thickness depend electrical characterization of $Al_2/Al_2O_3/CdS$ MOS structures”
M. Moğulkoç, M. Çalışkan, M. Serin, 29. Uluslararası Fizik Kongresi, MUĞLA/TÜRKİYE (2012)
2. *“Multiwalled Carbon Nanotube Doped Ardel / N-cds Mis Structure”*
F. Kuruoglu, M. Mogulkoc, M. Caliskan, D. Sakar, M. Serin, Nano-TR 7 29 Haziran-1 Temmuz Sabancı Üniversitesi – İSTANBUL/TÜRKİYE (2011)
3. *“Mesogenik 5 Dodesiloksi-2(((4(S)(2Metilbutoksi)Fenil)İmino)Metil)Fenol ün Termodinamik Etkileşim Parametrelerinin Ters Gaz Kromatografisi İle Belirlenmesi”*,
F. Sesigür, D. Sakar, O. Yasa-Sahin, F. Kuruoglu, F. Cakar, M. Mogulkoc, M. Caliskan, O. Cankurtaran, M. Serin, B. Bilgin-Eran, İstanbul Üniversitesi, Kimya Günleri, İSTANBUL/TÜRKİYE (2011)
4. *“Electrical Characterization of PSDA-1,-2 and PSDA-b-PEG”*
O. Yazıcı, M. Caliskan, F. Kuruoglu, F. Cakar, M. Mogulkoc, M. Serin, F. Karaman, 28. Uluslararası Fizik Kongresi, MUĞLA/TÜRKİYE (2011)

5. *“Electrical Characterization of Thermotropic Liquid Crystal”*
F. Sesigür, D. Sakar, O. Yasa-Sahin, F. Kuruoglu, F. Cakar, M.
Mogulkoc, M. Caliskan, O. Cankurtaran, M. Serin, B. Bilgin-Eran,
28. Uluslararası Fizik Kongresi, MUĞLA/TÜRKİYE (2011)

Proje

1. Organik İnorganik Tabanlı İnce Film Hibrik Eklemlerin Yapısal,
Elektrik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi, 2011-01-01