ÇANKIRI KARATEKİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HfO_2 İNCE FİLMLERİN ATOMİK KATMAN BİRİKTİRME TEKNİĞİ İLE BÜYÜTÜLMESİ VE AKIM-İLETİM MEKANİZMALARININ İNCELENMESİ

Abdulsamed KAYA

FİZİK ANABİLİM DALI

ÇANKIRI
2017

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HFO_2 İNCE FİLMLERİN ATOMİK KATMAN BİRİKTİRME TEKNİĞİ İLE BÜYÜTÜLMESİ VE AKIM-İLETİM MEKANİZMALARININ İNCELENMESİ

Abdulsamed KAYA

Çankırı Karatekin Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Halit ALTUNTAŞ

Bu çalışmanın amacı, düşük büyütme sıcaklık aralıklarında atomik katman biriktirme (AKB) yöntemini kullanarak HfO_2 (Hafniyum Dioksit) dielektrik ince filmleri üretmek ve elektriksel özelliklerini incelemektir. Bu amaç kapsamında HfO_2 dielektik ince filmleri silikon (Si) alttaşlar üzerine 200 °C biriktirme sıcaklığında AKB yöntemi ile kaplandı. Kaplanan dielektrik fillerin elektriksel özelliklerini incelemek ve akım-iletim mekanizmalarını ortaya çıkarmak için Al/HfO_2/Si metal-oksit-yarıiletken (MOY) kapasitör yapıları oluşturuldu ve akım-voltaj (*I*-*V*) ve kapasitans-voltaj (*C*-*V*) ölçümleri yapıldı. Bu ölçüm sonuçları kullanılarak, HfO_2 filmlerin dielektrik sabiti 14 ve etkin oksit yük yoğunluğu 2.3×10^{11} cm^{-2} olarak hesaplandı. Akım-iletim mekanizmalarının uygulanan elektrik alana güçlü bir şekilde bağlı olduğu ve Schottky emisyon mekanizmasının düşük elektrik alanlarda, tuzak-yardımlı tünelleme mekanizmalarının ise yüksek elektrik alanlarda iletime sebep olduğu bulundu.

2017, 45 sayfa

ANAHTAR KELİMELER: Dielektrik, MOS, HfO_2, Atomik katman biriktirme

ABSTRACT

Master of Science Thesis

DEPOSITION OF HfO_2 THIN FILMS BY ATOMIC LAYER DEPOSITION TECHNIQUE AND INVESTIGATION OF CURRENT-TRANSPORT MECHANISMS

Abdulsamed KAYA

Cankiri Karatekin University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisors: Prof. Dr. Halit ALTUNTAŞ

The aim of this study, to deposit HfO_2 (Hafnium dioxide) dielectric thin films by atomic layer deposition (ALD) technique at low growth temperature ranges and investigate the electrical properties of the grown films. For this purpose, HfO_2 dielectric thin films were deposited on silicon (Si) substrates by ALD technique at a deposition temperature of 200 °C. To investigate the electrical properties of the deposited dielectric films and reveal current-conduction mechanisms, $Al/HfO_2/Si$ metal-oxide-semiconductor (MOS) capacitors were fabricated and current-voltage (*I-V*) and capacitance-voltage (*C-V*) measurements were performed. Using these measurement results, the dielectric constant of HfO_2 films was calculated as 14 and the effective oxide charge density to be $2.3x10^{11}$ cm^{-2}. It was found that the current-conduction mechanisms were strongly dependent on the applied electric field and Shottky emission and trap-assisted tunneling were found as the main conduction mechanisms at low and high electric fields, respectively.

2017, 45 pages

KeyWords: Dielectric, MOS, HfO_2, Atomic layer deposition

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

“HfO2 ince filmlerin atomik katman biriktirme tekniği ile büyütülmesi ve akım-iletim mekanizmalarının incelenmesi.” adlı bu çalışma 2014-2017 yılları arasında hazırlanarak Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne “Yüksek Lisans Tezi” olarak sunulmuştur. Bu araştırmanın amacı HfO2 dielektrik malzemesini düşük sıcaklıklarda atomik katman biriktirme yöntemi ile büyütmek ve dielektrik malzemenin akım-iletim mekanizmalarını inceleyerek elektriksel özellikleri hakkında bilgi edinilmesi amaçlamaktadır.

Çalışmanın her safhasında yakın ilgi ve önerileri ile beni yönlendiren, her zaman destekleyen ve çalışmanın yönlendirilmesinde ve yürütülmesinde yol gösteren, kıymetli fikirlerini esirgemeden sunan, değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Halit ALTUNTAŞ’a sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma Çankırı Karatekin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimi tarafından FF270516L11 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir. Bu çalışmaya verilen destekten dolayı Çankırı Karatekin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon (BAPK) birimine teşekkür ederim.

Tüm eğitim ve çalışma hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Abdulsamed KAYA

Çankırı, Aralık 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
SİMGELER DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ vii
ÇİZELGELER DİZİNİ ix
1. GİRİŞ 1
2. MATERYAL VE YÖNTEMLER 5
2.1. Dielektrik Malzemeler 5
2.2. Dielektrik Filmlerde Akım-İletim Mekanizmaları 7
2.3. Elektrot Sınırlı İletim Mekanizmaları 9
2.3.1. Schottky veya Termiyonik Emisyon 9
2.3.2. Fowler-Nordheim (F-N) Tünellemesi 11
2.3.3. Doğrudan Tünelleme 12
2.3.4. Termiyonik-Alan Emisyonu 14
2.4. Hacim Sınırlı İletim Mekanizmaları 15
2.4.1. Poole-Frenkel Emisyonu 15
2.4.2. Sıçrama İletim mekanizması 17
2.4.3. Omik İletim Mekanizması 18
2.4.4. Uzay-Yük Sınırlı İletim Mekanizması 20
2.4.5. İyonik İletim Mekanizması 21

2.4.6. Tanecik-Sınır Limitli İletkenliği 22

2.4.7. Tuzak-Destekli Tünelleme Mekanizması 23

3. DENEYSEL YÖNTEM 24

3.1. Hafniyum 24

3.2. Hafniyum dioksit (HfO_2) 24

3.3. HfO_2 dielektrik ince filmlerin AKB yöntemiyle üretilmesi 24

3.4. Omik ve doğrultucu kontakların oluşturulması 27

3.5. Deneysel Ölçüm Sistemi 30

4. DENEYSEL SONUÇLAR 31

4.1. Kapasitans-Voltaj (*C-V*) Karakteristikleri 31

4.2. Akım-Voltaj (*I-V*) Karakteristikleri 35

5. TARTIŞMA VE SONUÇ 39

KAYNAKLAR 42

ÖZGEÇMİŞ 45

SİMGELER DİZİNİ

A^*	Etkin Richardson Sabiti
AKB	Atomik Katman Biriktirme
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
C-V	Kapasitans - Voltaj
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor - Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken
E	Elektrik Alanı
E_{loc}	Lorentz Elektrik Alanı
FNT	Fowler-Nordheim Tünelleme
GeO_2	Germanyum Dioksit
HfO_2	Hafniyum(IV) Dioksit
I-V	Akım - Voltaj
J	Akım Yoğunluğu
K	Kelvin
MOS	Metal Oxside Semiconductor – Metal Oksit Yarıiletken
MOY	Metal – Oksit -Yarıiletken
MYM	Metal- Yalıtkan - Metal
MYY	Metal – Yalıtkan -Yarıiletken
N_{ss}	Lokalize Arayüzey Durumu
Si	Silisyum
SiO_2	Silisyum Dioksit
$SrTiO_3$	Sitronsiyum Titanat
Y_2O_3	İtriyum(III) Oksit
ZrO_2	Zirkonyum Dioksit
a	Tuzak Seviyeleri Arasındaki Ortalama Sıçrama Mesafesi
α_e	Elektronik Polarizasyon
C_{FB}	Düz-Bant Kapasitans
E_F	Fermi Enerji Seviyesi
N_{eff}	Etkin Yük Yoğunluğu
ε_r	Bağıl Dielektrik Sabiti
ε_0	Boşluktaki Geçirgenlik
h	Planck Sabiti
k	Boltzmann Sabiti
n	Dielektrik Materyalin İletkenlik Bandındaki Elektron Yoğunluğu
μ	Mobilite
m_0	Serbest Elektron Kütlesi
m^*	Dielektrik Materyal İçerisinde Elektronun Etkin Kütlesi
N_C	İletim Bandındaki Durum Yoğunluğu
$q\phi_T$	Dielektrik Film İçerisindeki Tuzak Enerjisi Seviyesi
q	Temel Elektronik Yük Değeri
σ	Elektriksel İletkenlik
ϕ_B	Bariyer Yüksekliği
t_{ox}	Dielektrik veya Oksit Filmin Kalınlığı
T	Mutlak Sıcaklık
V_{FB}	Düz Band Voltajı
V_{ox}	Dielektrik Film veya Oksit Film Üzerindeki Voltaj

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 1947 yılında Bell Laboratuvarında üretilen ilk transistör 1

Şekil 1.2 İçerisinde milyonlarca transistör bulunan bir çip (Intel) 2

Şekil 2.1 Dielektrik materyal içinde meydana gelen elektriksel kutuplanma 5

Şekil 2.2 Dielektrik filmlerde iletim mekanizmalarının sınıflandırılması (Chiu, 2014) ... 8

Şekil 2.3 Metal-yalıtkan-yarıiletken yapıda Schottky emisyonunun şematik enerji bant diyagramı (Chiu, 2014) 10

Şekil 2.4 Metal-yalıtkan-yarıiletken yapıda Fowler-Nordheim tünellemenin şematik gösterimi 11

Şekil 2.5 Metal-yalıtkan-yarı iletken yapıda doğrudan tünellemenin şematik enerji bant diyagramı 13

Şekil 2.6 (a) Metal-yalıtkan-yarı iletken yapıdaki termiyonik-alan emisyonunun şematik enerji bant diyagramı, (b) Termiyonik alan emisyonu, termiyonik emisyon ve alan emisyonunun karşılaştırılması 14

Şekil 2.7 Metal-yalıtkan-yarıiletken yapıda Poole-Frenkel emisyonunun şematik enerji bant diyagramı 16

Şekil 2.8 Metal-yalıtkan-yarıiletken yapıda sıçrama iletimi 17

Şekil 2.9 Metal-yalıtkan-yarıiletken yapıda omik iletimin enerji bant diyagramı 19

Şekil 2.10 Uzay-Yük sınırlı iletim mekanizmasının J-V karakteristiği. Vtr, geçiş voltajını, V_{TFL} ise tuzak dolu limit voltajıdır 20

Şekil 2.11 İyonik iletimin (a) Elektrik alan yokluğunda (b) E elektrik alanı varlığında oluşumu 21

Şekil 2.12 (a) Tanecik sınırı boyunca tuzaklanmış elektronların yük dağılımı, (b) tane sınırında ortaya çıkan potansiyel enerji bariyeri 22

Şekil 2.13 Tuzak-destekli tünelleme mekanizması.....23

Şekil 3.1 Atomik katman biriktirme yönteminin temel büyütme aşamaları.....25

Şekil 3.2 Savannah S100 Termal AKB Sistemi. (UNAM'ın izniyle) 26

Şekil 3.3 AKB yöntemiyle üretilen HfO_2 dielektrik filmlerin görüntüsü 27

Şekil 3.4 VAKSIS (PVD Vapor-3S) Termal Buharlaştırma Sistemi (UNAM-izniyle) .28

Şekil 3.5 ATV-Hızlı Isıl Tavlama Sistemi (UNAM'ın izniyle) 28

Şekil 3.6 Üretilen Al/HfO_2/p-Si metal-oksit-yarıiletken kapasitör yapıları.....29

Şekil 3.7 Üretilen Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapılarının şematik gösterimi 29

Şekil 3.8 (a) Keithley 4200-SCS semiconductor parameter analyzer, (b) Cascade Microtech PM-5 DC-probe station cihazı (UNAM-izniyle).....30

Şekil 4.1 Al/HfO2/p-Si kapasitör yapılarının C-V eğrisi.....31

Şekil 4.2 P-tipi yarıiletken üzerine üretilen kapasitör yapılarında yığılım, tüketim ve tersinir bölgelerinin oluşumu 32

Şekil 4.3 Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapılarının *I-V* eğrisi.....35

Şekil 4.4 Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapısında Schottky emisyon grafiği.....36

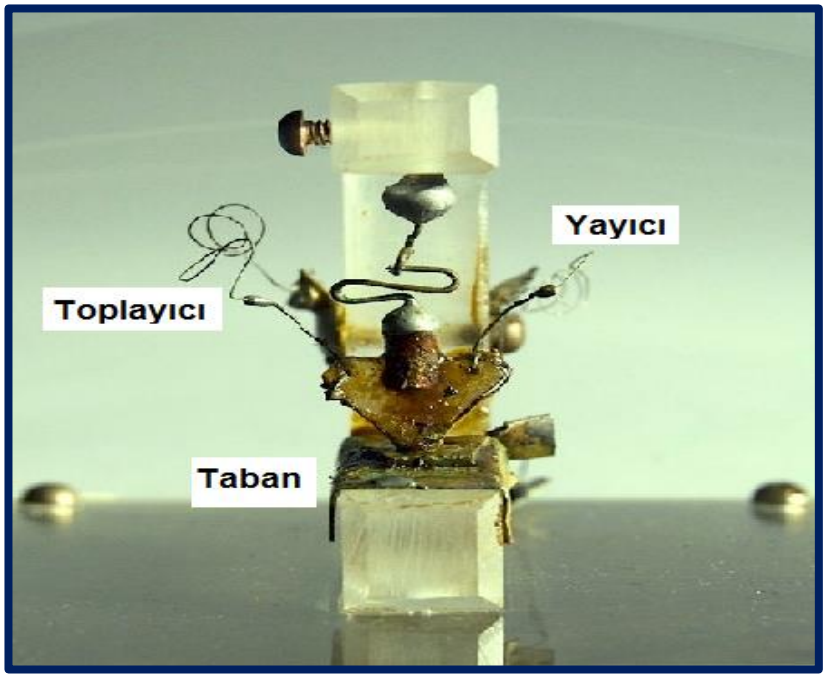
Şekil 4.5 Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapısında Tuzak-destekli tünelleme grafiği.....37

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 HfO_2 dielektrik filmlerin temel elektriksel parametreleri 34

1. GİRİŞ

William Shockley ve Bell Laboratuvarlarındaki meslektaşları, Şekil-1' de gösterilen ilk transistörü 1947 yılında icat ettiler ve bu icat modern katı-hal elektroniği devrini başlatmış oldu. İcat edilen bu transistörün temeli, silisyum gibi katı bir malzemede (yarı-iletken) elektrik akışının yabancı maddeler eklenerek kontrol edilebileceği keşfine dayanıyordu. Yarıiletken tabanlı bu transistörler icat edilmeden önce, vakum tüpü (termiyonik vana olarak da biliniyordu) o sırada bu görev için egemen bir teknolojiydi; ancak vakum tüpleri oldukça kırılgan, çok fazla güç gerektiren ve taşınması zor olan bir teknolojiydi.



Şekil 1.1 1947 yılında Bell Laboratuvarında üretilen ilk transistör

İlk katıhal transistörün icat edilmesinden günümüze kadar geçen süre içerisinde araştırmacılar hep daha küçük boyutlarda transistör üretmenin üzerine odaklanmışlardır. Bu kapsamda, entegre devrelerin temelini oluşturan ve çok küçük boyutlarda üretilen metal-oxide-semiconductor (MOS) kapasitör yapıları, çip ve transistör teknolojilerinin gelişmesinde çok önemli bir role sahip olan temel elektronik devre elemanlarıdır.

Günümüzde birkaç santimetre boyutlarındaki bir çipe milyonlarca transistör sığdırılabilmektedir (Şekil 1.2). Ancak bu devre elemanlarının minyatüre edilmesi ve

çok küçük boyutlarda üretilmesi devrelerde artan bir sızıntı akımının oluşmasına neden olmaktadır (Esakky and Kailath 2017, Kubo and Egawa 2017, Maity et al. 2017, Xiao et al. 2017, Xu et al. 2017). Sızıntı akımı elektronik devrelerin kararsızlığına ve güç kaybına neden olmaktadır. Oluşan bu sızıntı akımını olabildiğince düşük seviyelerde tutmak için geleneksel Silikon Dioksit (SiO_2) dielektrik malzemesi yerine çok daha yüksek dielektrik katsayısına sahip ve "high-*k* dielektrik" olarak adlandırılan Al_2O_3, Y_2O_3, HfO_2, GeO_2, ZrO_2 ve $SrTiO_3$ gibi alternatif malzemelerin kullanılmasına yönelik araştırmalar yoğun bir şekilde yapılmaktadır(Cheng et al. 2016, Dugu et al. 2016, Fadida et al. 2017, Han et al. 2017, Hattori et al. 2016, Jin et al. 2016, Kumar et al. 2016, Lei et al. 2017, Mazur et al. 2017, Patil et al. 2016, Shakhova et al. 2017, Srivastava et al. 2016, Zimmermann et al. 2016).



Şekil 1.2 İçerisinde milyonlarca transistör bulunan bir çip (Intel)

MOS kapasitörlerinde meydana gelen sızıntı akımının analiz edilmesi ve bu sızıntıya neden olan etkenlerin belirlenmesi, MOS kapasitörlerden oluşan diyotların, transistörlerin ve entegre devrelerin daha kaliteli, uzun ömürlü, kararlı ve daha hızlı çalışacak şekilde dizayn edilmelerini ve üretilmelerini sağlayacaktır. Bu devrelerin performansları ve kararlılıkları yarıiletken alttaşlar üzerine kaplanan oksit veya yalıtkan tabakanın kalitesine, yarı-iletken ve oksit tabakası arasında oluşan lokalize arayüzey

durumlarına (N_{ss}), ve oksit tabakası içerisinde oluşabilecek kusur tiplerine ve yoğunluğuna güçlü bir şekilde bağlıdır.

Yukarıda sıralanan yüksek dielektrikli materyaller içerisinde HfO_2(Hafniyum Dioksit), yüksek bir dielektrik katsayısına sahip olması (~ 25), geniş bir yasak band aralığına sahip olması (~ 5.8 eV) ve Si ile kontak yapıldığında termodinamik kararlılık göstermesi nedeniyle oldukça ilgi çekicidir (Ali et al. 2017, Botzakaki et al. 2016, Liu et al. 2017, Ondracka et al. 2016, Sementa et al. 2017, Sokolov et al. 2017, Zhang L. M. et al. 2017). HfO_2 dielektrik malzemesini üretmek için radyo-frekans magnetron kaplama, atımlı lazer biriktirme, elektron demet buharlaştırma, metal-organik kimyasal buhar biriktirme ve atomik katman biriktirme (AKB) gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler içerisinde AKB yöntemi, biriktirme parametrelerinin çok iyi bir şekilde kontrol edilebilmesinden dolayı en uygun yöntem olarak kabul görmektedir(Assaud et al. 2017, Botzakaki et al. 2016, Edy et al. 2017, Gope et al. 2015, McDaniel et al. 2015). Bir materyalin yapısal ve elektriksel özellikleri, materyalin büyütülme yöntemiyle yakından ilgilidir ve farklı yöntemler farklı özelliklerin oluşmasına neden olabilmektedir. Bilindiği üzere yarıiletken entegre devre teknolojisi daha düşük boyutlarda transistör kullanılmasını ve karmaşık nanoyapıların büyütülmesinine ihtiyaç duymaktadır. Bu durum uygun kaplama tekniklerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. Geniş alanlı alttaşlara homojen ince filmlerin kaplanması yarıiletken devre teknolojisi için çok elzem konuma gelmiştir. Bu özel gereksinimler, klasik fiziksel ve kimyasal büyütme teknikleriyle yapılamamaktadır. Ancak bu gereksinimler atomik katman büyütme tekniğiyle yapılabilmektedir. AKB yönteminin bu üstün özellikleri, bu tekniğe 1990' lı yıllarda itibaren yoğun bir ilgiyi beraberinde getirmiştir. 2007 yılında INTEL Şirketinin, CMOS devrelerinde dielektrik olarak yetersiz kalan SiO_2 yerine AKB yöntemini kullanarak çok daha küçük boyutlarda büyütülmüş ve yüksek dielektrik özellikli malzemeleri başarıyla kullanması, bu tekniğe olan ilgiyi müthiş derecede artırmıştır. Bu durum göstermektedir ki, AKB teknolojisi önümüzdeki yılarda ince filmlerin düşük sıcaklıklarda çok hassas kalınlık kontrolü yapılarak ve mükemmel homojenite elde edilerek büyütülmesi konusunda büyük bir potansiyele ve güncelliğe sahip olacaktır. Diğer taraftan, elektriksel ve dielektriksel olarak önemli özelliklere sahip olan HfO_2 dielektrik filmlerin temel elektriksel özelliklerinin çalışılması literatürde oldukça güncel ve yeniliklere açık bir konudur(Gao et al. 2015, Hosoi et al.

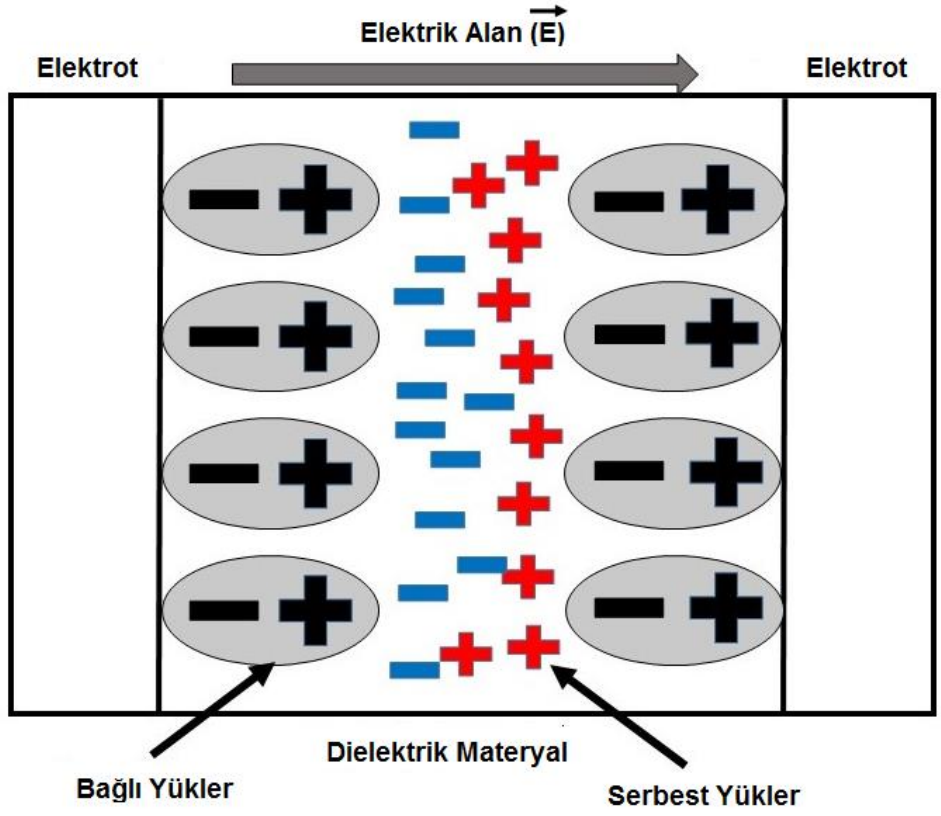
2013, Hudait and Zhu 2013, Salomone *et al*. 2016, Traore et al. 2015, Zhang Y. et al. 2016). Büyütme parametrelerinde yapılacak olan çok küçük bir değişim HfO_2 dielektrik filmlerin özelliklerinde farklılıklara neden olabilir.

Bu çalışmada, HfO_2 dielektrik ince filmleri Si alttaşlar üzerine AKB yöntemiyle 200 °C' de kaplandı. Kaplanan dielektrik filmlerin elektriksel karakteristiklerini incelemek için Al/HfO_2/Si metal-oksit-yarıiletken (MOY) kapasitör yapıları fabrike edildi. Elde edilen kapasitör yapılarının karanlık ortamda akım-voltaj (*I*-*V*) ve kapasitans-voltaj (*C*-*V*) ölçümleri alınarak, dielektrik filmlerde akım iletimine neden olan mekanizmalar teorik modeller kullanarak analiz edildi. Ayrıca kapasitör yapılarının temel elektriksel ve dielektriksel parametreleri hesaplandı.

2. MATERYAL VE YÖNTEMLER

2.1. Dielektrik Malzemeler

Dielektrik materyal yalıtkan veya elektrik akımını oldukça az ileten maddeler olarak ifade edilir(Chiu 2014). Bu materyaller içinde elektronlar birbirlerine çok sıkı bağlıdır. Dielektrikler bir elektrik alana yerleştirildiğinde, neredeyse hiçbir akım akmaz, çünkü metallerin aksine, dielektrik madde boyunca sürüklenebilecek serbest veya gevşek bağlı elektronlara sahip değildirler. Bunun yerine, dielektrik materyal içerisinde elektriksel bir kutuplanma (polarizasyon) meydana gelir. Şekil 2.1' de gösterildiği gibi, dielektrik içerisinde bulunan pozitif yükler elektrik alanla aynı olacak şekilde yer değiştirirler, negatif yükler ise uygulanan elektrik alanının tam tersi yönde yer değiştirirler. Bu hafif yük ayırımı veya polarizasyon, dielektrik madde içindeki net elektrik alanını azaltır(Chiu 2014).



Şekil 2.1 Dielektrik materyal içinde meydana gelen elektriksel kutuplanma

Elektriksel kutuplanma aslında dielektrik materyalin uygulanan dış elektrik alana karşı göstermiş olduğu bir tepkidir. Meydana gelen bu elektriksel tepki, kapasitörler gibi önemli elektronik devre elemanlarının yapılabilmesine imkan vermektedir.

Şekil 2.1' de gösterilen kapasitör modelini kullanarak, deneysel sistemlerle ölçülen kapasitans yardımıyla dielektrik malzemenin görece permitivitesini veya dielektrik sabiti (ε_r) tanımlanabilir. Dielektrik sabiti önemli bir parametredir ve aynı zamanda elektronik polarizasyon ya da α_e olarak bilinen başka bir terim ile de ilişkilidir. Elektronik polarizasyon tüm malzemelerde oluşan mikroskopik bir kutuplaşma olgusudur ve dielektrik polarizasyonu yönlendiren ana mekanizmalardan biridir. Dielektrik sabitinin bir malzemenin elektronik polarizebilitesi ile nasıl ilişkili olduğunu açıklamak için, bir malzemenin polarizasyonu veya *P* değeri belirlenmelidir. Bir maddenin polarizasyonu birim hacim başına düşen toplam dipol momenti olarak tanımlanır ve denklem şöyle ifade edilir(Von Hippel 1954);

$$P = N\alpha_e E = \chi_e \varepsilon_0 E \tag{2.1}$$

Burada, *E* uygulanan dış elektri alan, χ parametresine dielektrik materyalin elektronik alınganlığı denir ve $\chi = \varepsilon_r - 1$ olarak iafe edilir. Eşitlik 2.1' den materyalin dielektrik sabiti;

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{N\alpha_e}{\varepsilon_0} \tag{2.2}$$

Olarak elde edilir. Burada *N* birim hacim başına düşen molekül sayısıdır. Bu denklem, dielektrik sabitini elektronik polarizasyon ile ilişkilendirirken yalnızca malzemeyi bir bütün olarak ele alır ve lokal bir alana ya da dielektrikte bir molekülün oluşturduğu alanı hesaba katmamaktadır. Bu alan Lorentz alanı olarak bilinir ve bunu tanımlayan denklem şu şekilde verilir(Von Hippel 1954);

$$E_{loc} = E + \frac{1}{3\varepsilon_0} P \tag{2.3}$$

Dielektrik malzemeler, yukarıda belirtildiği üzere elektrik iletkenliğinin çok düşük olduğu ve yasak enerji bandı aralığının geniş olduğu materyallerdir. Genel olarak, yalıtkanların yasak enerji band aralığı değerleri yüksektir. Her ne kadar bütün

dielektrikler yalıtkanlar değilse de, tüm yalıtkanlar tipik dielektriklerdir. 0 K' de değerlik bandı tamamen doludur ve iletim bandı tamamen boştur. Böylece, elektrik iletimi için taşıyıcı yoktur. Sıcaklık 0 K'den büyük olduğunda, termal enerji nedeniyle valans bandından ve ayrıca verici safsızlık seviyesinden iletim bandına bazı elektronlar uyarılacaktır. Bu elektronlar, dielektrik materyalde elektrik iletimine katkıda bulunurlar. Benzer şekilde, valans veya değerlik bandında uyarılan elektronların geride bıraktığı veya safsızlık bandı tarafına geçen elektronların geride bıraktğı ve deşik (hole) oluşacaktır. Oluşan bu deşikler de elektrik iletimine katkıda bulunacaktır. Taşıyıcıların termal olarak uyarılmalarının yanında dielektrik materyale uygulanan nispeten büyük bir elektrik alanı da elektriksel iletimde rol oynamaktadır. Tezin ilk kısmında belirtildiği üzere bu iletim akımlarına veya diğer bir ifadeyle sızıntı akımlarına neden olan mekanizmların incelenmesi entegre devrelerin başarısı için büyük önem taşımaktadır. Çünkü elektronik cihazların kararlılığını olumsuz yönde etkileyen ve güç kaybına neden olan sızıntı akımının olabildiğince düşük olması gerekmektedir.

2.2. Dielektrik Filmlerde Akım-İletim Mekanizmaları

Dielektrik filmlerde elektriksel iletime neden olan mekanizmalar genel olarak iki kısıma ayrılmaktadır. Bunlar, elektrot limitli iletim mekanizmaları ve yığın veya hacim limitli iletim mekanizmalarıdır ve Şekil 2.2' de gösterilmiştir (Chiu 2014). Elektrot limitli iletim mekanizması elektrot-dielektrik kontak arayüzündeki elektriksel özelliklere bağlıdır. Bu tip iletim mekanizmasına dayanarak, elektrot-dielektrik arayüzündeki bariyer yüksekliğinin fiziksel özellikleri ile dielektrik filmlerdeki iletken taşıyıcıların etkin kütlesi çıkarılabilir. Elektrot limitli iletim mekanizmaları (1) Schottky veya termiyonik emisyon (2) Fowler-Nordheim tünellemesi, (3) Doğrudan tünelleme ve (4) Termiyonik-alan emisyonu olarak sayılabilir (Chiu 2014). Diğer taraftan hacim limitli iletim mekanizması doğrudan dielektrik filmin veya materyalin elektriksel özelliklerine bağlıdır. Bu iletim mekanizmalarının belirlenmesi çok önemlidir. Çünkü dielektrik film boyunca aynı anda iletim akımına katkıda bulunabilecek birtakım iletim mekanizmaları vardır. Çeşitli iletim mekanizmaları farklı yollarla sıcaklığa bağlı olduğundan, sıcaklığa bağlı iletkenlik akımları ölçmek, iletim akımlarının mekanizmalarını bilmek için yararlı bir yol sağlayabilir. Hacim limitli iletim mekanizmalarının analiz sonuçlarına göre, elektriksel olarak aktif tuzak seviyeleri, tuzak aralıkları, tuzak yoğunluğu, taşıyıcı

sürüklenme hareketliliği, dielektrik gevşeme zamanı ve yoğunluğu gibi dielektrik filmlerdeki birkaç önemli elektriksel parametre elde edilebilir. Hacim limitli elektriksel iletim mekanizmaları ise (1) Poole-Frenkel emisyonu, (2) Hopping veya sıçrama iletimi, (3) Omik iletim, (4) Uzay-yük sınırlı iletkenlik, (5) İyonik iletim ve (6) Tanecik-Sınır Sınırlı iletkenlik olarak sıralanabilir (Chiu 2014).



Şekil 2.2 Dielektrik filmlerde iletim mekanizmalarının sınıflandırılması (Chiu, 2014)

Dielektrik filmlerde elektrik iletkenlik ve meydana getirdiği sızıntı akımını ölçmek için genel olarak iki türlü kapasitör yapısı oluşturulur. Bunlardan birisi metal-yalıtkan-yarıiletken (MYY), diğeri ise metal-yalıtkan-metal (MYM) kapasitörleridir.

MYM tipi kapasitörlerde dikkate alınan konu, üst ve alt elektrotlar farklı metallerden yapılmış olduğunda, elektriksel iletim asimetrik şekilde meydana gelecektir. Farklı metaller genellikle farklı çalışma işlevlerine yol açarlar ve bu nedenle farklı metal-dielektrik arayüz bariyerlerine neden olurlar.

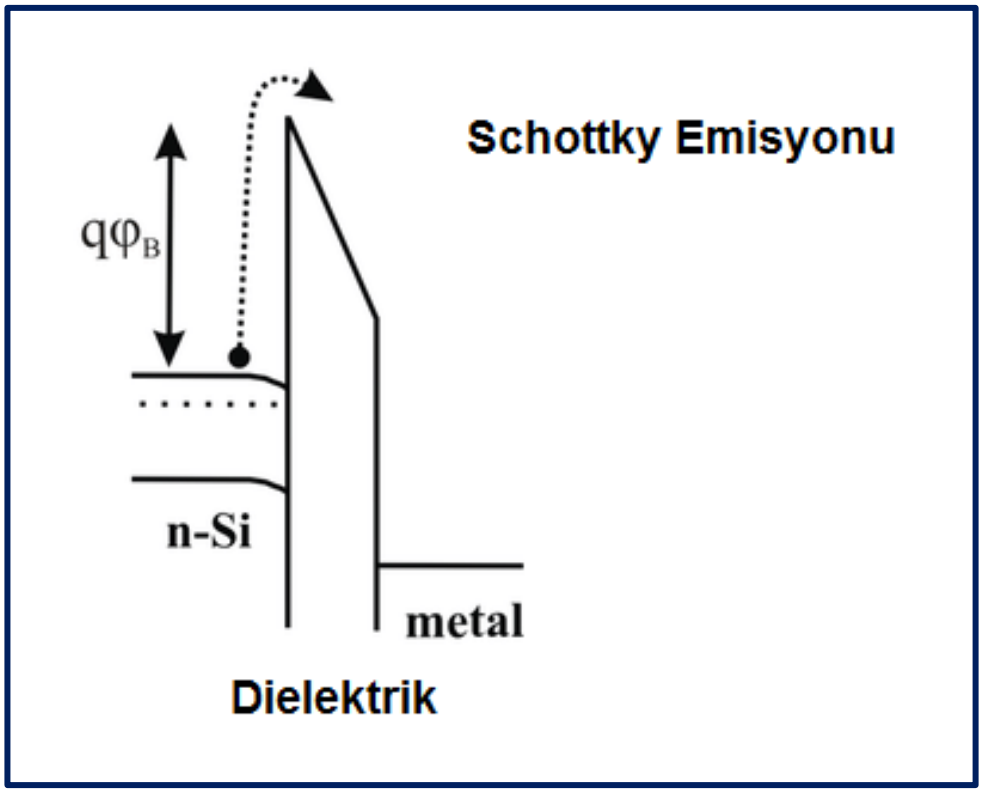
2.3. Elektrot Sınırlı İletim Mekanizmaları

Elektrot sınırlı iletme mekanizmaları elektrot-dielektrik temasındaki elektriksel özelliklere bağlıdır. Bu iletim mekanizması tipindeki en önemli parametre, elektrot dielektrik arayüzünde oluşan bariyer yüksekliğidir.

Elektrot sınırlı iletme mekanizmaları, (1) Schottky veya termiyonik emisyon, (2) Fowler-Nordheim tünellemesi, (3) doğrudan tünelleme ve (4) termiyonik alan emisyonu içerir. Termionik emisyona bağlı akım sıcaklığa oldukça bağımlıyken, tünelleme akımı neredeyse sıcaklıktan bağımsızdır. Elektrot-dielektrik ara yüzündeki bariyer yüksekliğinin yanı sıra, dielektrik filmlerdeki iletken taşıyıcıların etkin kütlesi de elektrot ile sınırlı iletme mekanizmalarında önemli bir faktördür.

2.3.1. Schottky veya Termiyonik Emisyon

Schottky emisyonu, elektronların yeterli miktarda termal veya ısıl enerji kazandıklarında, metal-dielektrik arayüzeyinde oluşan enerji bariyerini aşarak metalden ayrılma mekanizması olarak tanımlanmaktadır. Bu şekilde, termal enerjiyle elektriksel bariyeri aşarlar, dielektrik filme ulaşırlar ve elektriksel iletime katkıda bulunurlar (Chiu 2014). Bu durum görsel olarak Şekil 2.3’ te gösterilmiştir. Schottky emisyonu, dielektrik filmlerde, özellikle nispeten yüksek sıcaklıkta en sık gözlenen iletim mekanizmalarından biridir. Çünkü sıcaklığın artmasıyla daha fazla termal enerji kazanılır.



Şekil 2.3 Metal-yalıtkan-yarıiletken yapıda Schottky emisyonunun şematik enerji bant diyagramı (Chiu, 2014)

Schottky emisyon teorisinin matematiksel ifadesi (Sze and Ng 2006);

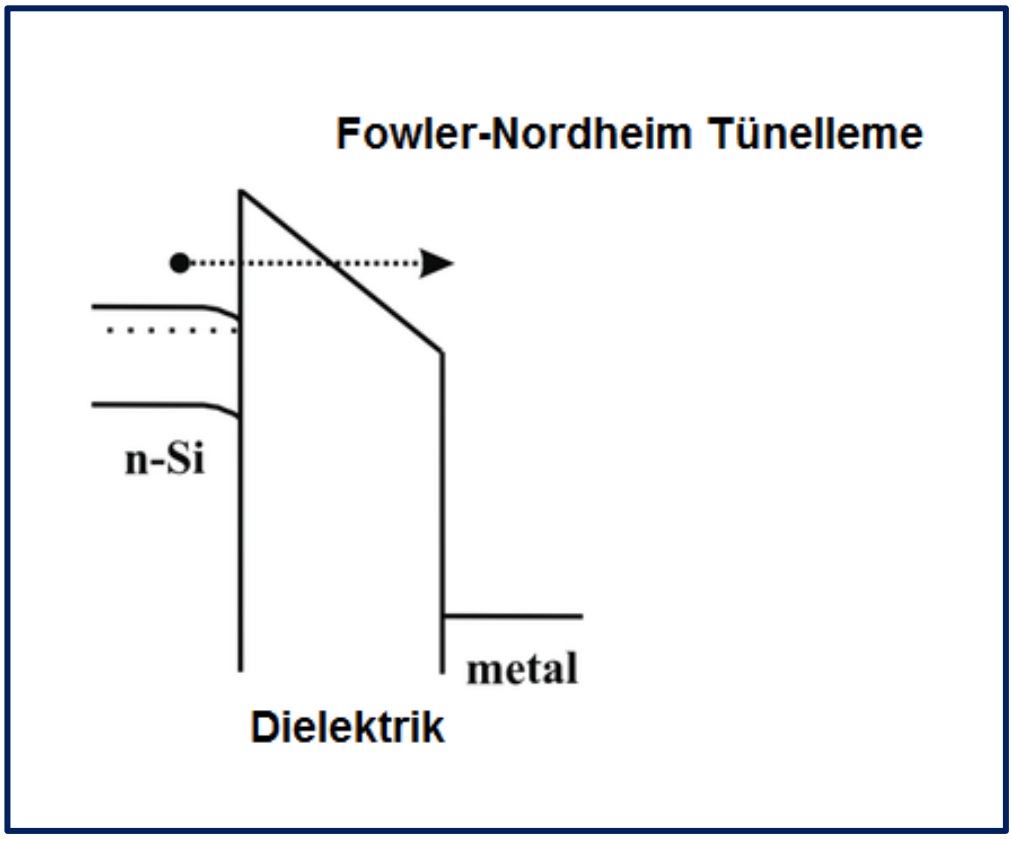
$$J = A^{*}T^{2}\exp\left[\frac{-q(\phi_B-\sqrt{qE/4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0}}{kT}\right] \quad (2.4)$$

$$A^{*} = \frac{4\pi q k^{2} m^{*}}{h^{3}} = \frac{120 m^{*}}{m_0} \quad (2.5)$$

Burada, J, akım yoğunluğunu, A*, etkin Richardson sabitini, $m_{0,}$ serbest elektron kütlesini, m*, dielektrik materyal içerisinde elektronun etkin kütlesini, T, mutlak sıcaklığı (K), q, temel elektronik yük değerini, $\phi_{B,}$ bariyer yüksekliğini, E, dielektrik üzerindeki elektrik alanı, k, Boltzmann sabitini, h Planck sabitini, ε_0 boşluktaki geçirgenliği ve ε_r ise dielektrik filmin relatif dielektrik sabitini göstermektedir.

2.3.2. Fowler-Nordheim (F-N) Tünellemesi

Alan emisyonu veya Fowler-Nordheim tünelleme (FNT) mekanizması, yüksek bir elektrik alan varlığında elektronların bariyer boyunca tünelleme yoluyla dielektrik materyalin iletim bandına geçmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu durum klasik fizikte açıklanamayan bir mekanizmadır. Kalasik fiziğe göre elektronların sahip olduğu enerji potansiyel bariyerinden düşükse, elektron bu bariyeri aşamaz ve elektron dalga fonksiyonları bariyerden geri yansır. Ancak kuantum fiziğine göre ise bariyer yeterince ince ise elektron dalga fonksiyonları potansiyel bariyerini sınırlı bir olasılıkla geçebilir. Bu olaya tünelleme adı verilir. F-N tünellemesinin görsel ifadesi Şekil 2.4' te verilmiştir.



Şekil 2.4 Metal-yalıtkan-yarıiletken yapıda Fowler-Nordheim tünellemenin şematik gösterimi

Ayrıca şunu belirtmek gerekir ki, dielektrik üzerine uygulanan elektrik alanı yeterince büyük olduğu zaman potansiyel bariyeri üçgen bir forma gelmekte ve elektronların karşılaştığı bariyer genişliği daha küçük olmaktadır. Kısacası bariyer genişliği azalarak daha ince hale gelmekte, böylece elektronların diğer tarafa tünelleme yapma olasılığı da artmış olmaktadır.

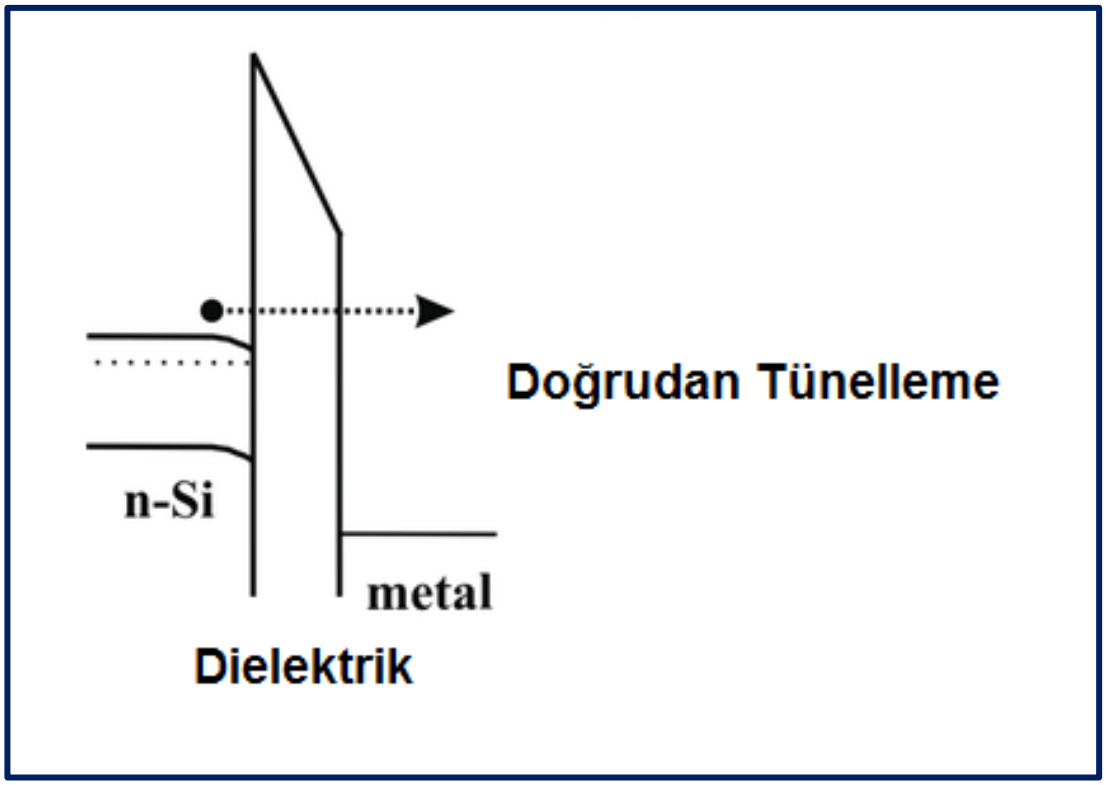
F-N tünelleme mekanizmasının matematiksel ifadesi şöyle verilmektedir (Sze and Ng 2006);

$$J = \frac{q^3 E^2}{8\pi h q \phi_B} \exp\left[\frac{-8\pi(2qm^*)^{1/2}}{3hE} {\phi_B}^{3/2}\right] \tag{2.6}$$

F-N tünelleme akımının ifadesinde, eşitlik 2.6' ya göre, $ln\ (J/E^2)$ değerlerinin $1/E$ değerlerine göre eğrisi doğrusal bir ifade vermelidir. Bu ifadeden yararlanarak bariyer yüksekliği elde edilebilir. Aynı zamanda elde edilen eğim dielektrik içerisinde elektronların etkin kütlesinin de bir fonksiyonudur.

2.3.3. Doğrudan Tünelleme

MYY kapasitör yapılarında dielektrik filmin ince olması durumunda doğrudan tünelleme akımı elektriksel iletime baskın olarak katkıda bulunan bir iletim mekanizmasıdır ve Şekil 2.5' te gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Metal-yalıtkan-yarı iletken yapıda doğrudan tünellemenin şematik enerji bant diyagramı

Doğrudan tünelleme yoluyla oluşan akım, dielektrik filmin kalınlığının azalmasına bağlı olarak üstel bir artış gösterir. Yani film kalınlığı azalırsa bu akımda büyük oranda bir artış beklenebilir. Doğrudan tünelleme neticesinde oluşan akım yoğunluğu ifadesi yalın halde şu şekilde verilebilir (Sze and Ng 2006);

$$J_{DT} = \frac{A}{t_{ox}^2} exp\langle -2t_{ox}\sqrt{\frac{2m^*q}{h^2}\left\{\phi_B - \frac{V_{ox}}{2}\right\}}\rangle \qquad (2.7)$$

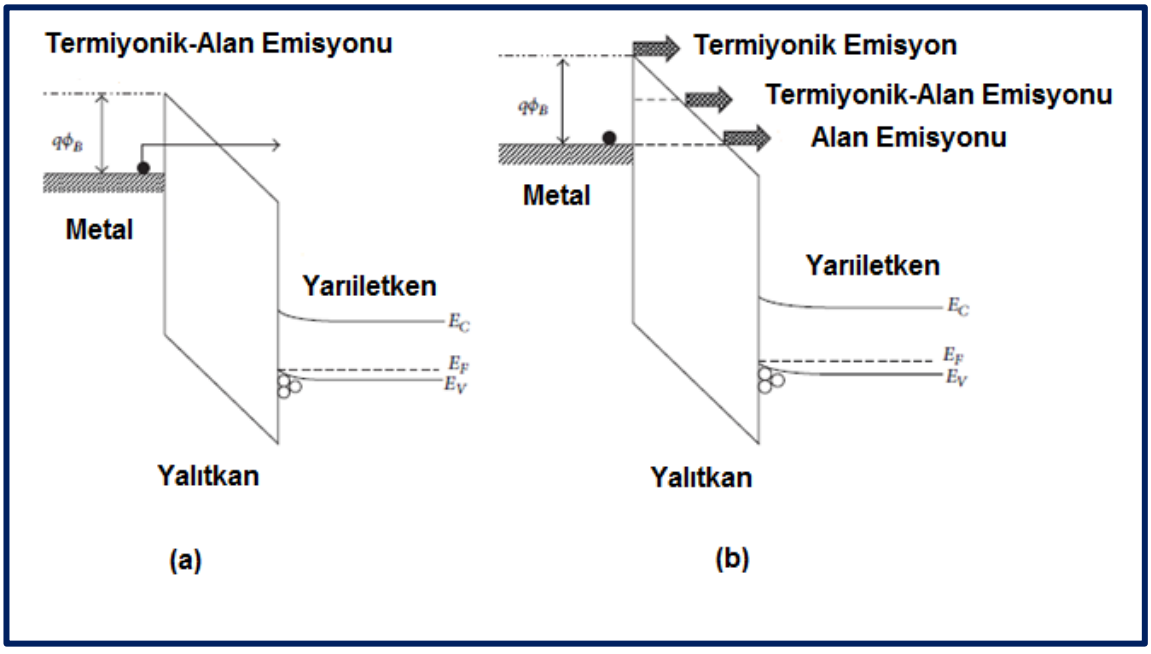
Burada, t_{ox} dielektrik veya oksit filmin kalınlığı, V_{ox}, dielektrik film veya oksit film üzerindeki voltajı ve A ise ölçü alınan kapasitör alanını göstermektedir. Doğrudan tünelleme nedeniyle oluşan elektriksel akımı düşürmenin yolu dielektrik filmin kalınlığının artırılması ya da yüksek dielektrik katsayılı dielektrik filmlerin kullanılmasıdır.

2.3.4. Termiyonik-Alan Emisyonu

Termiyonik alan emisyonu mekanizması, alan emisyonu ile Schottky emisyonu mekanizmaları arasında gerçekleşen bir elektriksel iletim mekanizmasıdır ve Şekil 2.6' da gösterilmiştir. Bu durumda, tünellemeyi yapan elektronların enerjisi, metalin Fermi seviyesi ile dielektrik materyalin iletkenlik bandı seviyesi arasında bir değere sahip olması gerekmektedir. Termiyonik emisyon, termiyonik alan emisyonu ve alan emisyonu arasındaki fark Şekil 2.6' ta gösterilmiştir.

Termiyonik alan emisyonuna bağlı olarak meydana gelen elektriksel akım yoğunluğu ifadesi kabaca şu şekilde ifade edilebilir (Sze and Ng 2006);

$$J = \frac{q^2\sqrt{m}(kT)^{1/2}E}{8h^2\pi^{5/2}} \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \exp\left[\frac{h^2q^2E^2}{24m(kT)^3}\right] \tag{2.8}$$



Şekil 2.6 (a) Metal-yalıtkan-yarı iletken yapıdaki termiyonik-alan emisyonunun şematik enerji bant diyagramı, (b) Termiyonik alan emisyonu, termiyonik emisyon ve alan emisyonunun karşılaştırılması

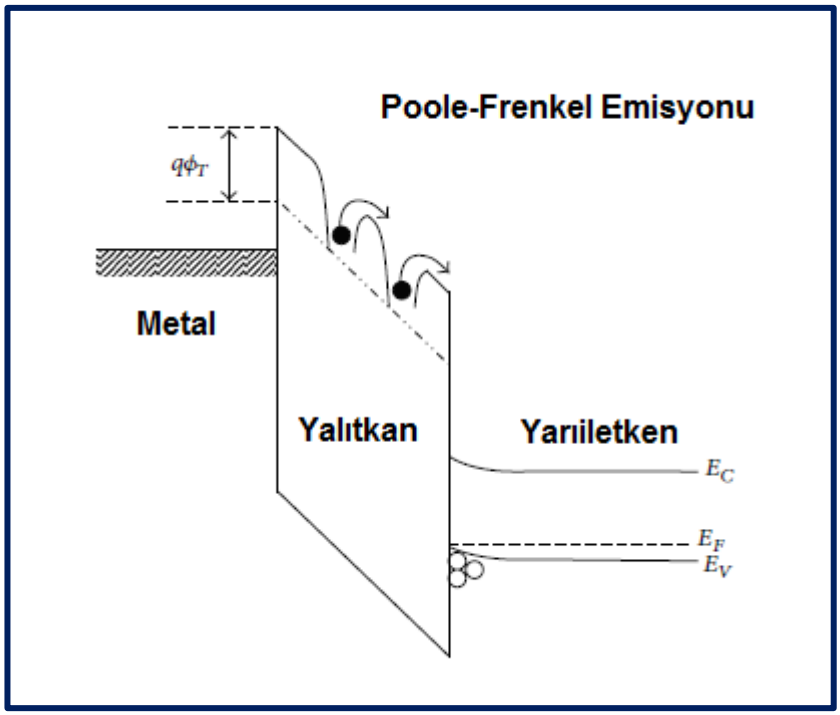
2.4. Hacim Sınırlı İletim Mekanizmaları

Bulk veya hacim sınırlı elektriksel iletim mekanizmaları doğrudan dielektrik filmlerin elektriksel özelliklerine bağlı olan mekanizmalardır. Dielektrik filmlerin içerisinde oluşan elektriksel olarak aktif tuzak "trap" seviyeleri bu tip elektriksel iletim mekanizlarına yol açmaktadır. Bu tuzaklar aynı zamanda yapısal kusurlar olarak ta adlandırılabilir ve bu kusurlar sonucu oluşan tuzak seviyeleri hacim sınırlı elektriksel iletim mekanizmalarında önemli bir rol oynamaktadır. Hacim sınırlı elektriksel iletim mekanizmaları, (1) Poole-Frenkel emisyonu, (2) sıçrama iletkenlik mekanizması, (3) ohmik iletkenlik, (4) uzay yükü-sınırlı iletkenlik, (5) iyonik iletkenlik ve (6) tane-sınır limitli iletim olarak sıralanabilir.

Hacim iletim mekanizmalarının teorik eşitliklerini kullanarak, elektriksel olarak aktif tuzak enerji seviyelerini, tuzak seviyelerinin derinliklerini, tuzak yoğunluklarını, taşıyıcıların mobilitelerini ve dielektrik gevşeme zamanı gibi dielektrik filmlerdeki bazı önemli elektriksel parametreler elde edilebilmektedir.

2.4.1. Poole-Frenkel Emisyonu

Poole-Frenkel (P-F) emisyonu, dielektrik materyal içerisindeki elektriksel olarak aktik tuzaklarda bulunan ve termal enerjiye sahip olan elektronların, dielektrik filme uygulanan elektrik alan yardımıyla tuzaklardan ayrılarak iletkenlik bandına geçen ve böylece elektriksel iletime neden olan bir iletkenlik mekanizmasıdır. Elektronların dielektrik film içerisinde bulunan tuzaklarda yerleşik olarak kalmasını sağlayan Coulomb potansiyel enerjisi, dielektrik filme uygulanan elektrik alan aracılığıyla azalır ve böylece termal enerjiye sahip olan elektronlar azalan bu potansiyel enerjiyi yenerek tuzaklardan kurtulurlar ve iletim bandına geçerek iletime katkıda bulunurlar. Kısacası, potansiyel enerjideki azalma, bir elektronun, tuzaktan kurtularak dielektrikin filmin iletken bandına termal olarak uyarılma ihtimalini artırabilir. Bu durum Şekil 2.7' de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Metal-yalıtkan-yarıiletken yapıda Poole-Frenkel emisyonunun şematik enerji bant diyagramı

.

Poole-Frenkel iletim mekanizması şekil olarak Schottky emisyon mekanizmasına benzer ve dielektrik filmin içerisinde gerçekleştiği için bazen "iç-Schottky emisyonu" olarak da ifade edilir. Poole-Frenkel iletim mekanizması nedeniyle oluşan akım yoğunluğunun ifadesi şu şekilde verilir (Sze and Ng 2006);

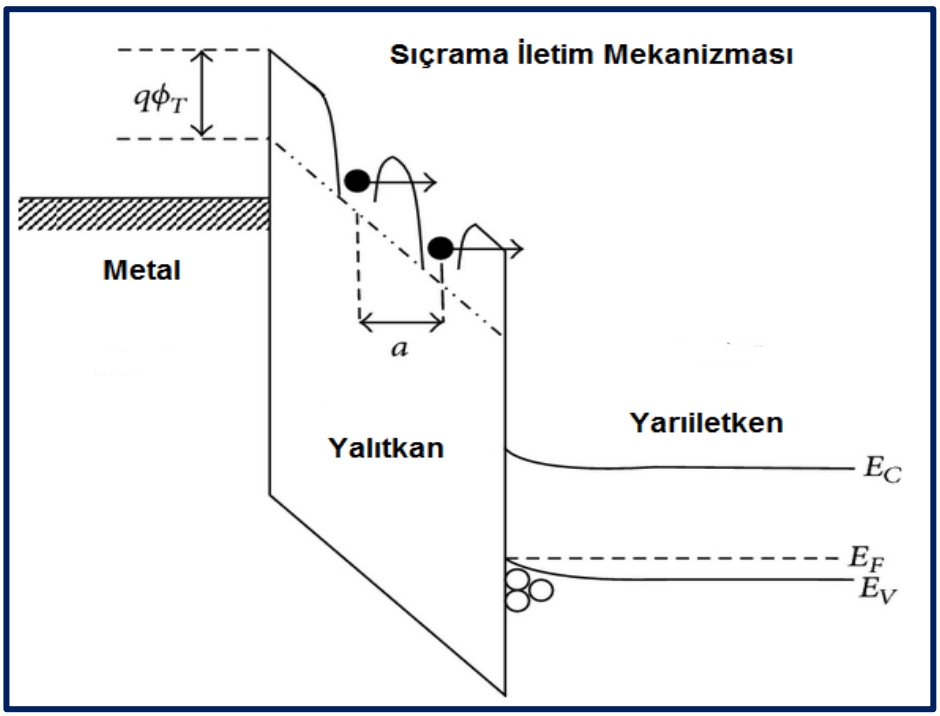
$$J = q\mu N_C E \exp\left[\frac{-q\left(\phi_T - \sqrt{qE/\pi\varepsilon_i\varepsilon_0}\right)}{kT}\right] \tag{2.9}$$

Burada, μ, mobilite, N_C, iletim bandındaki durum yoğunluğu, $q\phi_T$, dielektrik film içerisindeki tuzak enerjisi seviyesi, ε_i yalıtkan veya dielektrik filmin dielektrsik sabitini ifae etmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi P-F emisyonu, termal enerji ve elektrik alan etkisiyle oluşan bir akım iletim mekanizmasıdır. Bu nedenle P-F emisyonu genellikle yüksek sıcaklık ve yüksek elektrik alan altında gözlemlenmesi beklenir. P-F emisyon mekanizması varlığında Ln(J/E) verilerinin $E^{1/2}$ verileriyle elde edilen eğrinin doğrusal bir korelasyon göstermesi gerekmektedir. Ancak elde dilen grafiğin doğrusal bir

davranış göstermesi, dielektrik filmin iletim mekanizmasının P-F emisyonu olacağını garanti etmez. Yalıtkan veya dielektrik filmin, Eşitlik 2.9' dan elde edilen dielektrik sabitinin dielektrik materyalin statik ve optiksel dielektrik sabitiyle uyum içesinde olması beklenir. Genel olarak literatürde bu iki değerin arasında olması gerektiği ifade edilmektedir. Bu uyumun gerçekleşmesi durumunda belirtilen elektriksel alan aralığı için dielektrik filmdeki elektriksel akım iletim mekanizmasının P-F emisyonu kaynaklı olduğu ifade edilebilir. Diğer taraftan P-F emisyon mekanizması dielektrik film içerisindeki tuzak seviyelerinin belirlenmesi sağlayabilir.

2.4.2. Sıçrama İletim mekanizması

Sıçrama veya zıplama terimi "hopping" ile ifade edilen bu iletkenlik mekanizması, dilelektrik film içerisinde yerleşik kusur yapılarının meydana getirdiği tuzak seviyeleri arasında elektronların bir tuzak bölgesinden diğer tuzak bölgesine atlaması veya geçmesi nedeniyle oluşan elektriksel iletim olarak tanımlanabilir. Sıçrama iletimi aslında dielektrik film içerisinde oluşan düzensiz veya kusurlu yapılardan kaynaklanmaktadır. Bu durum Şekil 2.8' te gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Metal-yalıtkan-yarıiletken yapıda sıçrama iletimi

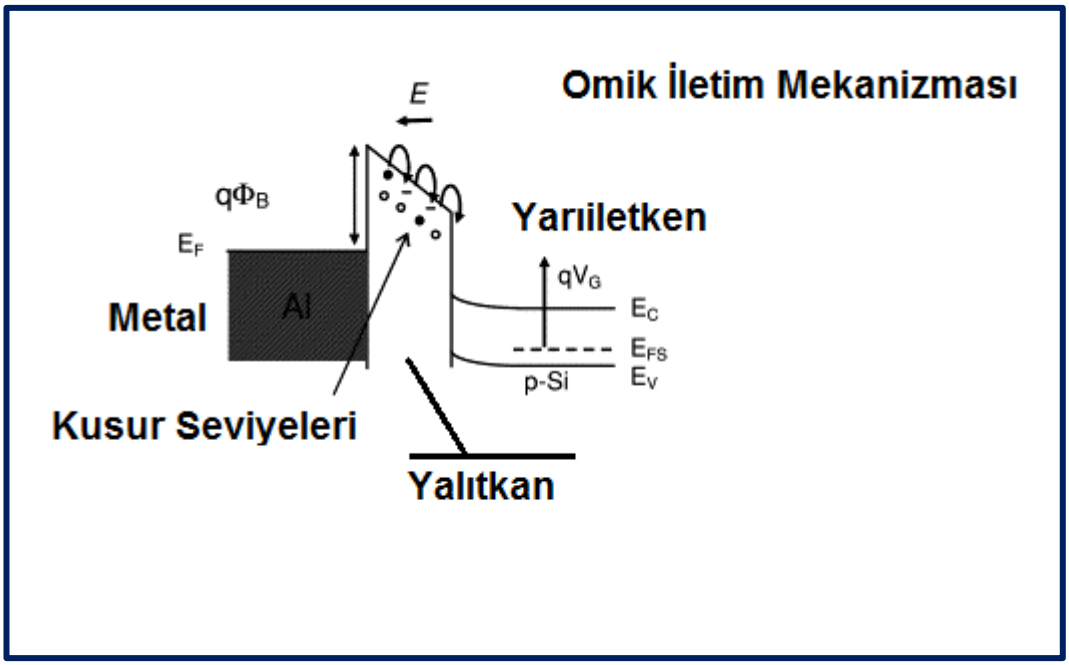
Sıçrama iletim mekanizması nedeniyle oluşan elektriksel akım yoğunluğunun ifadesi şöyledir (Sze and Ng 2006):

$$J = qanv \exp\left[\frac{qaE}{kT} - \frac{E_a}{kT}\right] \quad (2.10)$$

Burada, a, tuzak seviyeleri arasındaki ortalama sıçrama mesafesidir, n, dielektrik materyalin iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğunu, v tuzak seviyelerindeki elektronların termal titreşim frekansıdır. E_a ise tuzak seviyesi ile iletkenlik bandı arasındaki enerji seviyesidir ve aktivasyon enerjisi olarak yanımlanır. Hatırlanacağı gibi P-F emisyonu iletim mekanizmasında termiyonik etki önemliydi ve elektronlar sahip oldukları termal enerji ve uygulanan elektrik alanın bariyeri düşürmesi sonucu engel yüksekliğini aşarak iletme katkıda bulunabiliyorlardı. Sıçrama iletiminde ise iletim mekanizması aslında bir nevi tünellemeyle ilişkilidir. Eşitlik 2.10 ile verilen ifade kullanılarak, Ln (J) değerlerinin E değerlerine göre çizilen grafiğin doğrusal kesiminin eğiminden tuzak seviyeleri arasındaki ortalama sıçrama mesafesi ve aktivasyon enerji değerleri elde edilebilir. Dielektrik materyal içerisindeki tuzak seviyeleri hakkında daha detaylı bilgi sahibi olmak için elektriksel akım ölçümlerinin geniş bir sıcaklık aralığında alınması gerekmektedir. Çünkü tuzak enerji seviyeleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişebilmektedir. Eğer tuzaklar derin enerji seviyelerde bulunuyorsa düşük elektrik alanlarda bu tuzaklardan elektronları çıkarmak için termal enerji gerekir.

2.4.3. Omik İletim Mekanizması

Omik iletim mekanizması, dielektrik filmin iletim bandındaki hareketli elektronların ve değerlik (valans) bandındaki deşiklerin hareketinden kaynaklanan bir elektriksel iletim mekanizmasıdır. Bu iletim mekanizmasında elektriksel akım yoğunluğuyla dielektrik film üzerine uygulanan elektrik alan değişimi arasında lineer veya doğrusal bir davranış bulunmaktadır. Şekil-2.9’ da elektronların dielektrik film içerisinde omik iletimi gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Metal-yalıtkan-yarıiletken yapıda omik iletimin enerji bant diyagramı

Dielektriklerin materyallerin yasak enerji band aralıkları büyük olmasına rağmen, termal uyarımdan dolayı oluşabilecek az sayıda taşıyıcı bulunabilecektir. Örnek olarak elektronlar değerlik bandından veya tuzak seviyesinden iletkenlik bandına uyarılabilmektedir. Ancak uyarılan elektronların sayısı oldukça küçüktür ama sıfır değildir. Omik iletim mekanizması sonucu oluşan elektriksel akım yoğunluğunun ifadesi şu şekilde verilebilir (Sze and Ng 2006);

$$J = \sigma E = nq\mu E \tag{2.11}$$

$$n = N_C \exp\left[\frac{-(E_C - E_F)}{kT}\right] \tag{2.12}$$

Burada, σ, elektriksel iletkenliği, E_F, Fermi enerji seviyesini, n, iletim bandındaki elektronların sayısı, μ, elektronların mobilitelerini ve N_C iletken bandındaki etkin durum yoğunluğunu göstermektedir.

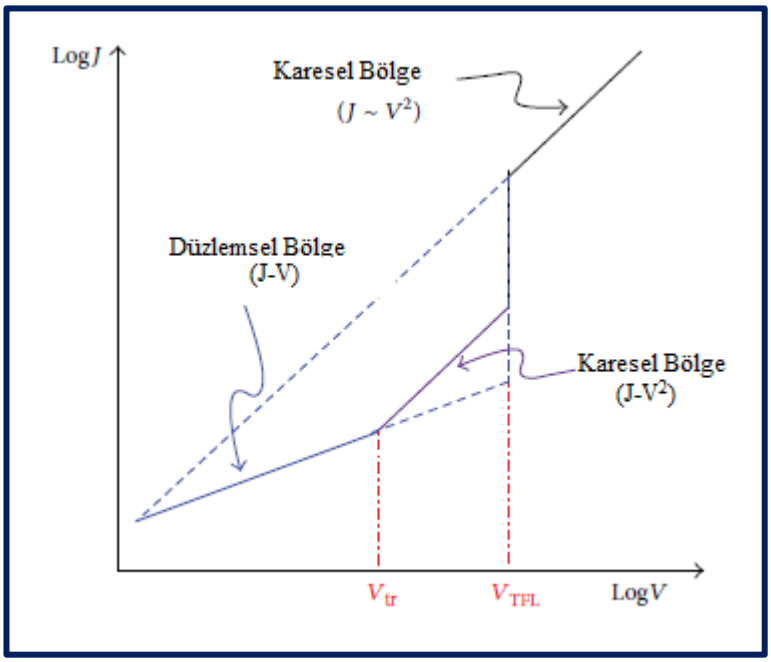
Bir dielektrik materyalde yasak enerji band aralığı çok büyük olduğu için, Fermi enerji seviyesinin enerji band aralığının ortasına yakın olduğunu varsayabiliriz; yani, E_C- E_F ~ E_g/2 olarak ifade edilebilir. Bu durumda omik iletim akımı şöyle ifade edilir;

$J = q\mu E N_C \exp(-E_g/2kT)$ (2.13)

Bu akımın büyüklüğü çok küçüktür ve genellikle dielektrik filmlerin akım-voltaj (I-V) karakteristiklerinde çok düşük voltajlarda veya elektrik alanlarında gözlemlenebilir. Omik elektriksel iletim mekanizmasında, akımyoğunluğunun elektriksel alan değerlerine göre çizilen grafik doğrusal bir bağıntı göstermelidr ve doğrunun eğiminin 1' e yakın olması gerekmektedir.

2.4.4. Uzay-Yük Sınırlı İletim Mekanizması

Uzay yükü sınırlı akım iletim mekanizması (space charge limited conduction), denge yük yoğunluğunun (yük enjeksiyonundan önce), enjekte edilen yük konsantrasyonuna kıyasla ihmal edilebilir olduğunda ortaya çıkan bir elektriksel iletim mekanizmasıdır. Bu, enjeksiyon yapılan elektrotun yakınında bir boşluk veya alan bulutu oluşturacaktır ve boşluk yükünün konsantrasyonu elektrottan hızla uzaklaşır. Bu rejimde, akım elektrik alanının karesi ile orantılı olacak şekilde bir artış gösterir. Uzay-yük-sınırlı akım için bir log$J$-log$V$ eğrisinde çizilen tipik bir J-V karakteristiği Şekil 2.10' da gösterilmektedir.



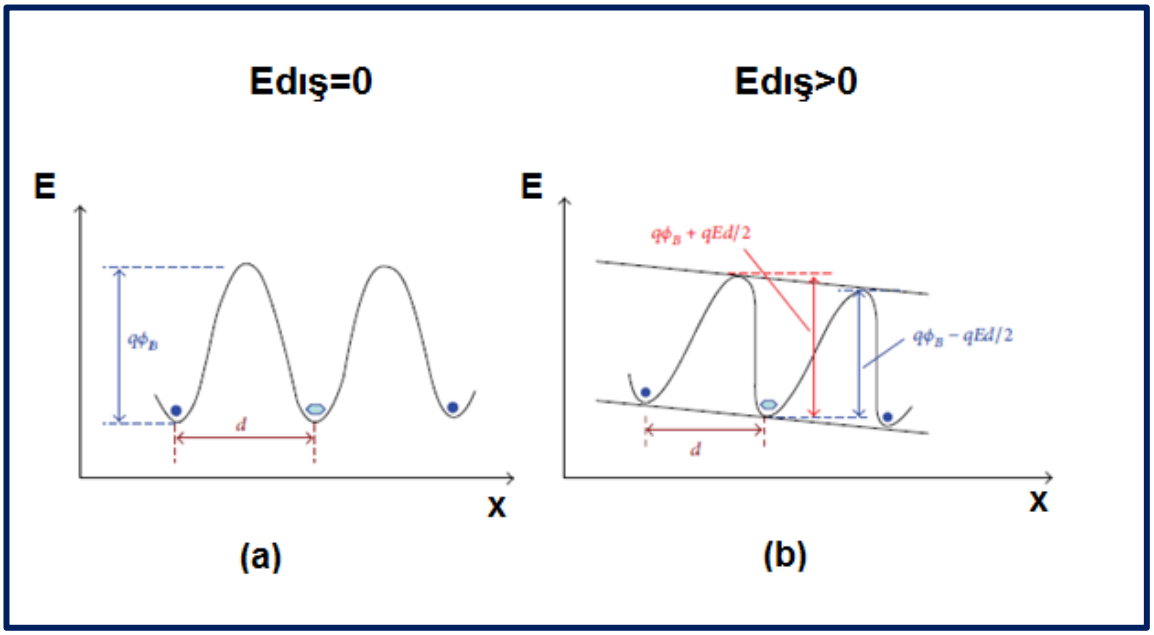
Şekil 2.10 Uzay-Yük sınırlı iletim mekanizmasının J-V karakteristiği. Vtr, geçiş voltajını, V_{TFL} ise tuzak dolu limit voltajıdır

2.4.5. İyonik İletim Mekanizması

İyonik iletim mekanizması esas olarak uygulanan bir elektrik alanı altındaki iyonların hareketinden kaynaklanmaktadır. İyonların hareketi, dielektrik filmlerde kafes kusurlarının varlığından gelebilir. Kusur enerjisi seviyelerinde, elektrik alanının etkisi nedeniyle, iyonlar bir potansiyel bariyerinin üzerinden diğerine atlayabilirler. Şekil 2.11 (a) ve (b)' de sırasıyla elektrik alan yokluğunda ve elektrik alan varlığında iyonik iletimin oluşumu gösterilmektedir. İyonik iletim akımı şu şekilde ifade edilebilir (Sze and Ng 2006):

$$J = J_0 \exp\left[-\left(\frac{q\phi_B}{kT} - \frac{Eqd}{2kT}\right)\right] \tag{2.14}$$

Burada, J_0 orantı sabitidir, $q\phi_B$ potansiyel bariyer yüksekliğini, E uygulanan elektrik alanın şiddetini ve d iki yakın atlama sahasının aralığını göstermektedir.



Şekil 2.11 İyonik iletimin (a) Elektrik alan yokluğunda (b) E elektrik alanı varlığında oluşumu

İyonların kütleleri büyük olduğu için, iyonik iletim mekanizması genellikle CMOS teknolojisindeki dielektrik filmlerin uygulamaları için önemli değildir.

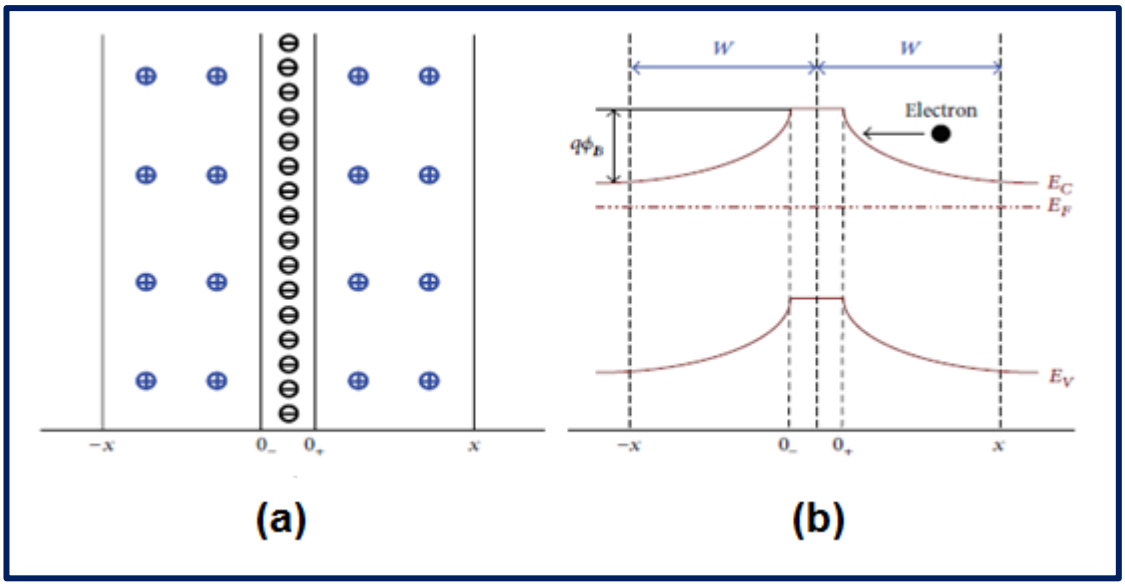
2.4.6. Tanecik-Sınır Limitli İletkenliği

Bir polikristalik dielektrik malzemede, tane sınırlarının elektriksel direnci tanelerinkinden çok daha yüksek olabilir. Bu nedenle elektriksel iletim akımı, tane sınırlarının elektriksel özellikleri ile sınırlandırılabilir. Bu durumda elektriksel iletim mekanizmasına tane sınır limitli elektriksel iletim mekanizması denir. Tanecik sınırları etrafında bir tane sınır potansiyel enerji bariyeri (ϕ_B) oluşacaktır. Potansiyel enerji bariyeri şu şekilde yazılabilir:

$$\Phi_B = q\Phi_B = \frac{q^2 n_b^2}{2\varepsilon N} \tag{2.15}$$

Burada n_b tanecik sınır tuzak yoğunluğudur, ε dielektrik malzemenin göreli dielektrik sabiti ve N dopant yoğunluğudur. Eşitlik 2.15'ten anlaşılacağı üzere dielektrik sabitinin tane sınırlarındaki potansiyel enerji bariyerini önemli ölçüde etkilediği görülebilir.

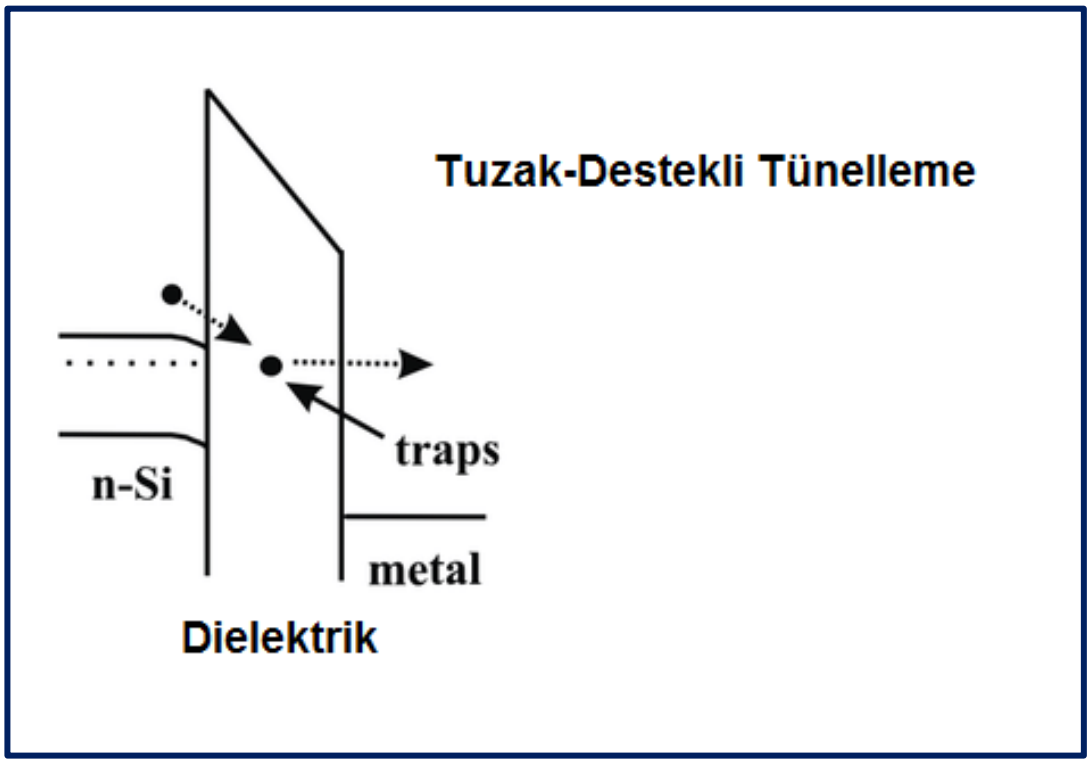
Şekil 2.12 (a)' da tane sınırı boyunca hapsolmuş elektronların yük dağılımını ve tane sınırının yanındaki tükenme bölgelerinin varlığını göstermektedir. Şekil 2.12 (b)' de ise tanecik sınırındaki potansiyel enerji bariyeri gösterilmiştir.



Şekil 2.12 (a) Tanecik sınırı boyunca tuzaklanmış elektronların yük dağılımı, (b) tane sınırında ortaya çıkan potansiyel enerji bariyeri

2.4.7. Tuzak-Destekli Tünelleme Mekanizması

Bu iletim mekanizması iki-aşamalı veya adımlı iletim mekanizmaso olarak tanımlanır. Birinci aşamada elektriksel olarak iletime katkıda bulunacak elektronlar tuzak bölgelerine geçerler ve ikinci aşamada yüksek elektrik alanın etkisiyle hemen hemen üçgen biçimini alarak daha az bir etkin kalınlığa sahip dielektrik veya yalıtkan materyalden tünelleme yaparak diğer tarafa geçerler. Burada özellikle yüksek elektrik alan, tünelleme olasılığının artmasında önemli bir etkendir. Bu durum Şekil 2-13' de gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Tuzak-destekli tünelleme mekanizması

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Hafniyum

Atom numarası 72, atom ağırlığı 178.6 olan ve doğada az rastlanılan bir elementtir. Kısaltması Hf olarak ifade edilir. 1923 yılında Dirk Coster ve Georg von Hevest tarafından Danimarka'da keşfedilmiştir. Genellikle zirkonyum ve bileşiklerinin içerisinde bulunmaktadır. Erime sıcaklığı 2222 °C ve özgül ağırlığı 12.1 g/cm^3 olarak verilmektedir. Hf materyali nükleer reaktörlerde nötron tutucu olarak kullanılır ve korozyona karşı oldukça dirençli bir metaldir.

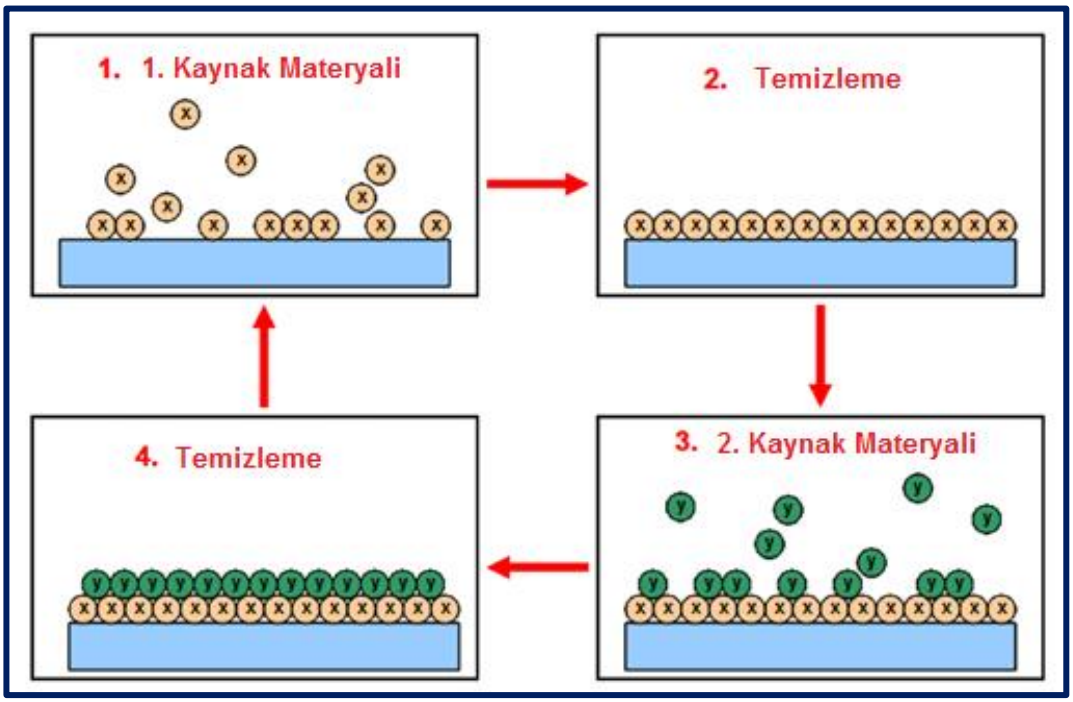
3.2. Hafniyum dioksit (HfO_2)

Hafniyumun en kararlı oksit bileşiklerinden birisidir. Erime sıcaklığı oldukça yüksektir (~2800 °C) ve yasak band enerji aralık değeri 6 eV civarında olması nedeniyle elektriksel olarak yalıtkan özellik göstermektedir. Elektronik endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan alttaş olan Silikon malzemesi üzerine biriktirildiğinde termal olarak kararlılık göstermesi, dielektrik sabitinin SiO_2 materyaline göre oldukça yüksek olması ve kimyasallara karşı da dirençli olması nedeniyle HfO_2 oldukça ilgi çeken bir bileşiktir. Düşük biriktirme veya büyütme sıcaklıklarında genellikle amorf yapıya sahip olurken, yüksek biriktirme sıcaklıklarında kristalize bir yapıya dönüşmektedir.

3.3. HfO_2 dielektrik ince filmlerin AKB yöntemiyle üretilmesi

AKB tekniği özel bir kimyasal buhar kaplama tekniğidir. Bu teknikte, alttaş yüzeyi üzerinde ardışık ve kendini limitleyen reaksiyonlar oluşur. Bu reaksiyon mekanizması sebebiyle, düşük büyütme sıcaklıklarında atomik ölçekte kalınlık kontrolü ve mükemmel derecede homojen bir kaplama elde edilebilir. AKB yönteminin en temel büyütme basamakları Şekil 3.1' de gösterilmiştir. AKB yöntemi üzerine çalışmalar 1960 yıllarının başlarında Rusya Bilim Akademisinden Prof. V. B. Aleskovskii tarafından yapılmış ve o zamanlar bu yöntem "Molecular Layering" olarak adlandırılmıştır (Shevjakov et al. 1965). 1970' li yıllarda ise Finlandiya grubundan Dr. Suntola ve arkadaşları tarafından "Atomic Layer epitaxy" olarak adlandırılmış ve bu yöntemi kullanarak ince film düz panel tipi ekranlarda kullanılmak üzere ilk olarak ZnS materyalini başarıyla kaplamışlardır. 1980' de ise ilk defa bu yöntemle üretilen bu

ekranlar başarıyla Helsinki Havalimanında kullanılmaya başlanmıştır. 1990 yıllardan itibaren ise bu teknik "Atomic Layer Deposition" olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 3.1 Atomik katman biriktirme yönteminin temel büyütme aşamaları

Bilindiği üzere yarıiletken entegre devre teknolojisi daha düşük boyutlarda transistör kullanılmasını ve karmaşık nanoyapıların büyütülmesinine ihtiyaç duymaktadır. Bu durum uygun kaplama tekniklerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. Geniş alanlı alttaşlara homojen ince filmlerin kaplanması yarıiletken devre teknolojisi için çok elzem konuma gelmiştir. Bu özel gereksinimler, klasik fiziksel ve kimyasal büyütme teknikleriyle yapılamamaktadır. Ancak bu gereksinimler atomik katman büyütme tekniğiyle yapılabilmektedir. AKB yönteminin bu üstün özellikleri, bu tekniğe 1990' lı yıllarda itibaren yoğun bir ilgiyi beraberinde getirmiştir. 2007 yılında INTEL Şirketinin, CMOS devrelerinde dielektrik olarak yetersiz kalan SiO_2 yerine AKB yöntemini kullanarak büyütülmüş çok daha küçük boyutlarda ve yüksek dielektrik özellikli malzemeleri başarıyla kullanması, bu tekniğe olan ilgiyi müthiş derecede artırmıştır

(Suntola and Antson 1977). Bu durum göstermektedir ki, AKB teknolojisi önümüzdeki yılarda ince filmlerin düşük sıcaklıklarda çok hassas kalınlık kontrolü yapılarak ve mükemmel homojenite elde edilerek büyütülmesi konusunda büyük bir potansiyele ve güncelliğe sahip olacaktır.

Bu çalışma kapsamında HfO_2 dielektrik ince filmler, İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi-UNAM Laboratuvarında kurulu olan ve Şekil 3.2' de gösterilen "Savannah S100" termal AKB sistemi ile büyütülmüştür. Büyütme işlemine başlamadan önce ilk olarak p-tipi ve (100) yönelimli Si alttaşları ultrasonik banyo kullanılarak izopropanol, aseton, metanol ve deiyonize su ile temizlendi. Atomik katman biriktirme tekniği kullanarak HfO_2 ince filmleri temizlenen Si alttaşı üzerine kaplamak için Si alttaşlar hemen AKB sistemine yüklendi ve precursor kaynaklarının uygun sıcaklığa gelmeleri beklendi.



Şekil 3.2 Savannah S100 Termal AKB Sistemi. (UNAM'ın izniyle)

AKB sisteminde Hf kaynağı olarak Tetrakis(dimethylamino)hafnium (HFDMA) precursor ve oksijen kaynağı olarak H_2O precusor kullanıldı. Si alttaş sıcaklığı 200 °C' ye set edildi. Biriktirilen HfO_2 dielektrik film kalınlığı 50 nm olacak şekilde adımlar set edilerek program çalıştırıldı. Si alttaşlar üzerine biriktirilen HfO_2 filmlerin resmi Şekil 3.3' te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 AKB yöntemiyle üretilen HfO_2 dielektrik filmlerin görüntüsü

3.4. Omik ve doğrultucu kontakların oluşturulması

HfO_2 dielektrik filmlerin elektriksel iletim mekanizmalarını incelemek için Al/HfO_2/p-Si metal-oksit-yarıiletken kapasitör yapıları oluşturulmalıdır. Böylece akım-voltaj ve kapasitans-voltaj ölçümleri yapılabilir ve iletim mekanizmaları hakkında bilgi sahibi olunabilir. Bu sebeple, Si alttaşların arka kısmına yüksek saflıkta Al metali Şekil 3.4' te gösterilen termal buharlaştırma sistemi kullanılarak kaplandı. Kaplanan Al tabakasının kalınlığı 80 nm olarak belirlendi. Al kaplama işlemi tamamlandıktan sonra alttaşlar 400 °C sıcaklığında 2 dakika süreyle N_2 gazı ortamında Şekil 3.5' te gösterilen sistemle

tavlama işlemine maruz bırakılarak Al katmanının Si alttaşlar içerisine difüz etmesi sağlandı. Böylece p-Si alttaşların arka yüzeyine Al omik kontağı alınmış oldu.

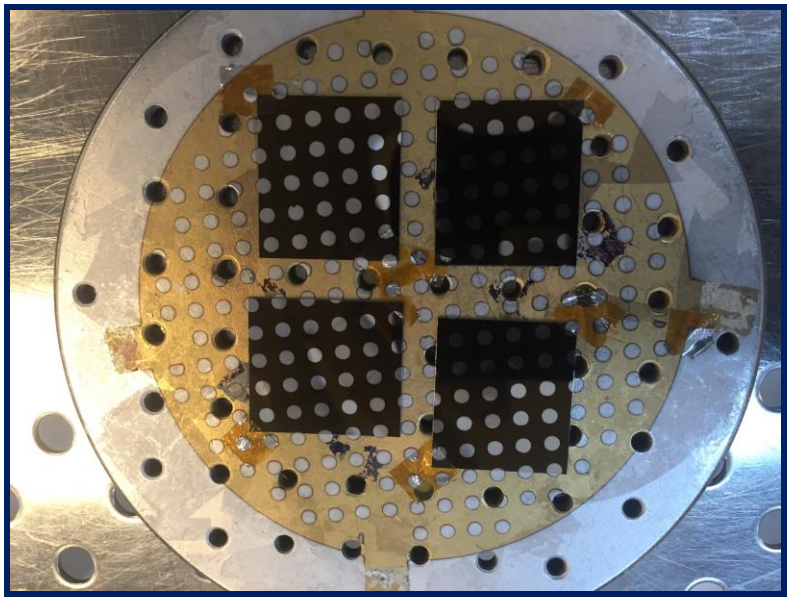


Şekil 3.4 VAKSIS (PVD Vapor-3S) Termal Buharlaştırma Sistemi (UNAM-izniyle)

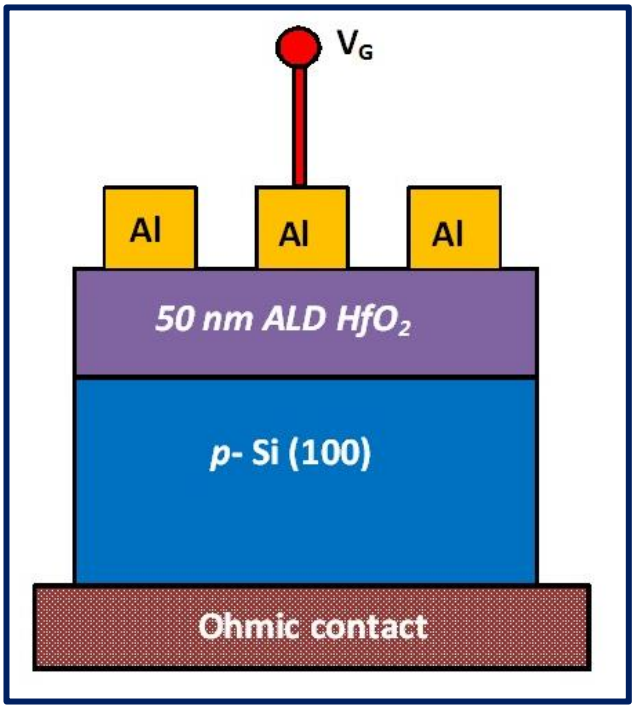


Şekil 3.5 ATV-Hızlı Isıl Tavlama Sistemi (UNAM'ın izniyle)

Omik kontak işlemi tamamlandıktan sonra doğrultucu kontakların alınması işlemine geçildi.



Şekil 3.6 Üretilen Al/HfO_2/p-Si metal-oksit-yarıiletken kapasitör yapıları

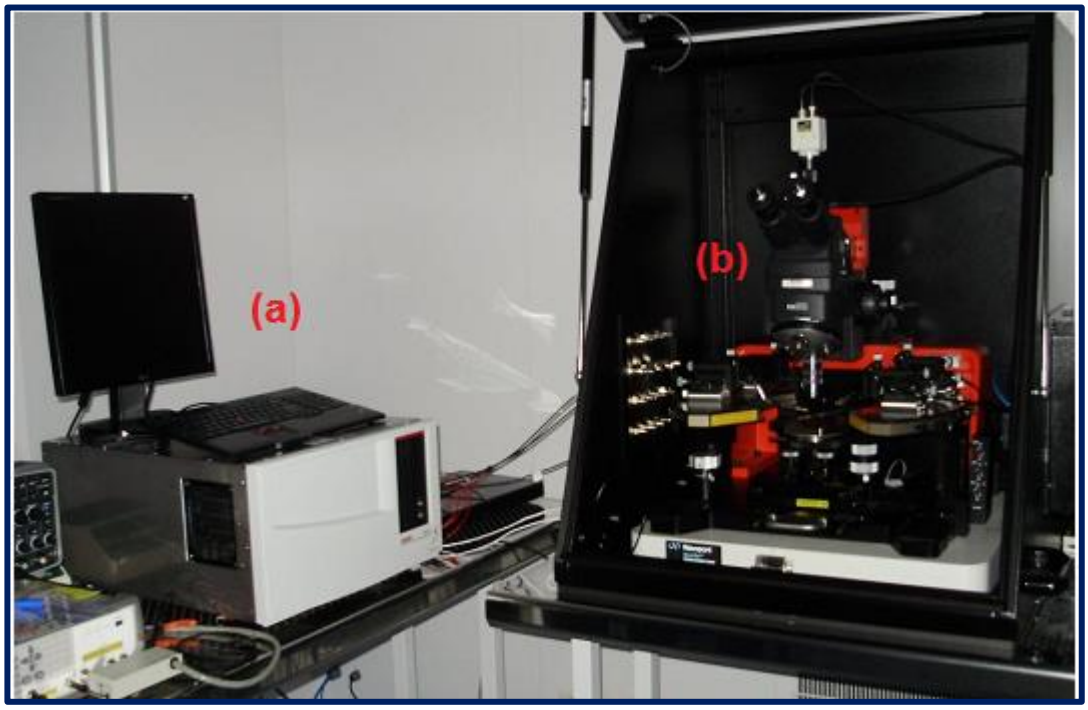


Şekil 3.7 Üretilen Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapılarının şematik gösterimi

Bu işlem için üzerinde 2 mm çapında dairesel boşuklar bulunan paslanmaz çelik bir maske kullanıldı. Bu maske aracılığıyla tekrar termal buharlaştırma sistemi kullanılarak 80 nm kalınlığında Al metali maske üzerinden dielektrik film üzerine buharlaştırıldı. Omik ve doğrultucu kontakların tamamı yüksek basınç ve vakum altında yapıldı. Oluşan metal-oksit-yarıiletken yapıların görüntüsü Şekil 3.6' da ve Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapılarının şematik gösterimi de Şekil 3.7' de verilmiştir.

3.5. Deneysel Ölçüm Sistemi

Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapılarının elektriksel özelliklerini belirlemek için İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi-UNAM Laboratuvarında kurulu olan ve Şekil 3.8' de gösterilen Keithley 4200-SCS semiconductor parameter analyzer cihazı ve Cascade Microtech PM-5 DC-probe station cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.8 (a) Keithley 4200-SCS semiconductor parameter analyzer, (b) Cascade Microtech PM-5 DC-probe station cihazı (UNAM-izniyle)

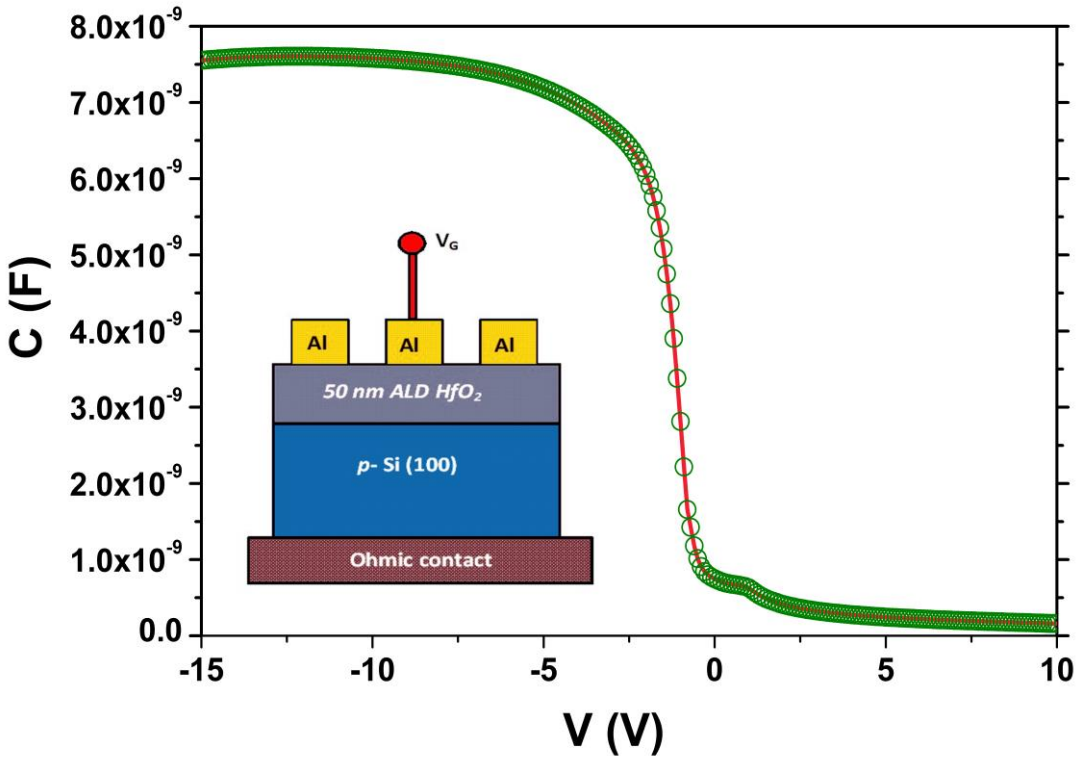
HfO_2 dielektrik ince filmlerin kapasitans özellikleri ve devre yapılarından geçen akım fabrike edilen Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapılarına uygulanan geniş bir voltaj aralığı

altında ölçüldü ve analiz edildi. Cascade Microtech PM-5 DC-probe station cihazında bulunan mikro iğnelerin yarıiletken cihazın yüzeyindeki metal kontaklara hassas konumlandırılmasıyla elektriksel sinyal ölçümleri yapıldı. Bu şekilde Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapılarının akım-voltaj (*I-V*) ve kapasitans-voltaj (*C-V*) ölçümleri elde edildi. Bütün ölçümler oda sıcaklığında (300 K) ve karanlık ortamda yapıldı.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

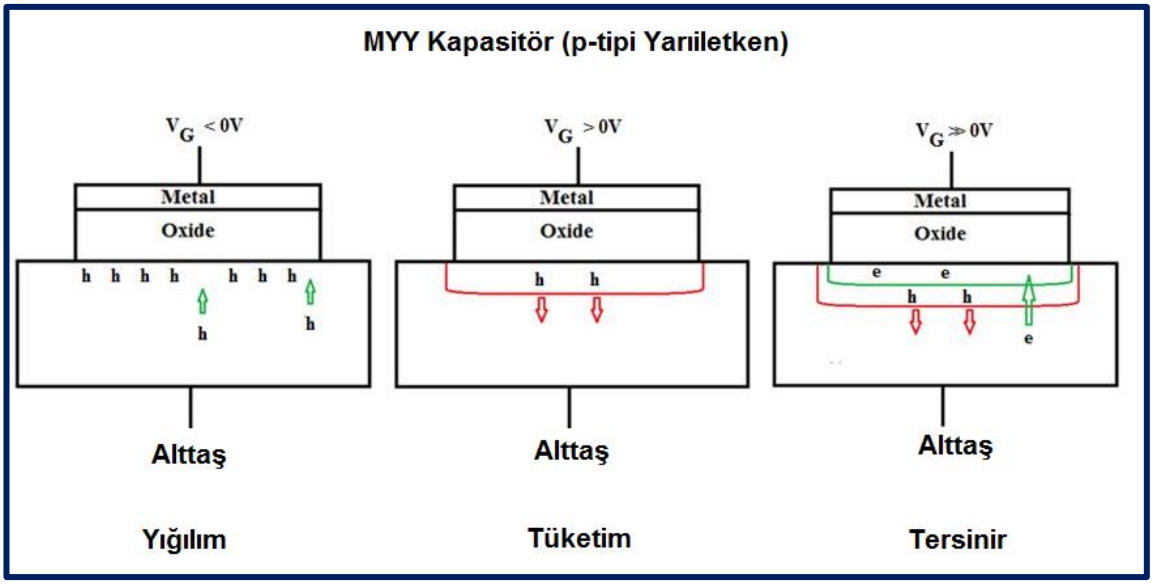
4.1. Kapasitans-Voltaj (*C-V*) Karakteristikleri

Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapılarının kapasitans karakteristiklerini incelemek üzere -15 V-+10 V voltaj aralığında ve arayüzey katkılarını indirmek için 300 kHz frekans değerinde yapılan *C-V* ölçümü Şekil 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.1 Al/HfO2/p-Si kapasitör yapılarının C-V eğrisi

Şekil 4.1’ den görüleceği üzere *C-V* eğrisi yığılım (toplanım), tüketim ve tersinim olmak üzere üç bölgeden oluşmaktadır. Yığılım bölgesi saturation “doyum” eğrisine yakın bir davranış göstermesine rağmen çok hafif bir pik eğilimi görülmüştür. Bu durum genel olarak literatürde ara yüzeylerde oluşan tuzak seviyeleri, seri direnç ve yalıtkan tabakanın elektriksel özelliklerine ithaf edilmektedir. C-V eğrisinde oluşan yığılım, tüketim ve tersinir bölgeleri önemli elektriksel ve dielektriksel parametereleri elde etmek için kullanılır. Metal-yalıtkan-yarıiletken kapasitör yapısının yığılım, tüketim ve tersinir bölgelerindeki davranışı Şekil 4.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 P-tipi yarıiletken üzerine üretilen kapasitör yapılarında yığılım, tüketim ve tersinir bölgelerinin oluşumu

Metal kontağın negatif voltaj beslemi ve yarıiletken alttaşın positif voltaj beslemi altında yariletken içerisndeki deşikler yarıiletken yüzeyine doğru ve metal içerisindeki elektronlarda dielektrik yüzeyine doğru hareket ederek toplanmaya başlarlar. Bu yük artışının neticesinde dielektrik yüzeylerinde küçük aralıklarda maksimum yük birikmesi oluşur ve bu durum maksimum kapasitans oluşmasına neden olur. Şekil 4.1’ de görüleceği üzere büyük negatif beslem altında yığılım bölgesi oluşmaktadır. Metal elektrot üzerine uygulanan voltaj sayısal olarak küçüldükçe ve pozitif değere doğru

yaklaştıkça yarıiletken içersisindeki deşikler dielektrik kısımdan alt tarafa doğru hareket etmesinden dolayı dielektrik yakınındaki yükler azalacak yani tükenecektir. Bu durumda ölçülen kapasitans değerinde belirgin bir düşüş olacaktır. Metal elektrot üzerine uygulanan volatj büyük değerlerde pozitif olmaya başlayınca yarıiletken içersindeki elektronlar dielektrik kısma doğru itilecek ve böylece pozitif yük yoğunluğu fazla olan p-tipi yarıiletkenin yüzeyine büyük oranda negatif yük toplanacaktır. Bu bölgeye tersinir bölge denir ve bu durumda kapasitansı minimumdur. Yukarıda bahsedildiği üzere bu üç bölgenin analiz edilmesi sonucu önemli elektriksel ve dielektriksel parametrelerin elde edilmesini sağlamaktadır.

Güçlü yığılım bölgesinde oluşan maksimum kapasitans C_i kullanılarak yalıtkaan filmin dielektrik sabiti ε_d;

$$C_i = \varepsilon_d \varepsilon_0 A / t_d \tag{4.1}$$

İfadesiyle hesaplanır. Burada t_d, dielektrik filmin kalınlığıdır, A, kapasitörün alanı olup 0.0314 cm^2 değerine eşittir ve ε_0 ise serbest uzayın geçirgenliğidir. Eşitlik 4.1 kullanılarak HfO_2 filmin dielektrik sabiti yaklaşık 14 olarak hesaplandı.

Dielektrik içerisinde ve dielektrik-yarıiletken ara yüzeyinde bulunan etkin yükler pozitif veya negatif tiplerine bağlı olarak *C-V* eğrisini sağa ya da sola kaydırabilir. İdeal bir *C-V* eğrisinde yığılım bölgesinden tüketim bölgesine geçiş voltajı ki bu voltaja Flat-band voltajı veya düz band voltajı denir ve bu voltajın 0 V olması beklenir. Ancak gerçek durumda bu voltaj etkin yükler nedeniyle 0 V değerinden sapmaya uğramaktadır. Bu sapma değerinden yararlanarak dielektrik filmde bulunan ve etkin yük yoğunluğu (N_{eff}) değeri ;

$$N_{eff} = \frac{C_i(\phi_{ms} - V_{FB})}{qA} \tag{4.2}$$

İfadesinden hesaplanabilir. Burada, V_{FB} düz band voltajını ve ϕ_{ms} ise Al ve yarıiletken (Si) arasındaki iş-fonsiyonlarının farkını göstermektedir.

Burada, V_{FB}'yi saptamak için, düz-bant kapasitans (C_{FB}) yöntemi kullanılabilir. Düz-bant koşulunda p-tipi Si yüzeyi şöyle ifade edilir;

$$C_{FBS} = \frac{\varepsilon_{Si}\varepsilon_0}{\lambda} \quad (4.3)$$

Burada, ε_{Si}, Silikonun dielektrik sabitidir (yani 11.8) ve λ, p-tipi Silikonun Debye uzunluğudur ve şöyle ifade edilir;

$$\lambda = \left(\frac{\varepsilon_{Si}\varepsilon_0 kT}{q^2 N_A}\right)^{0.5} \quad (4.4)$$

Burada, *k*, Boltzmann sabiti, *T*, mutlak sıcaklık ve N_A, p-tipi Si alt tabakasının katkı konsantrasyonudur. N_A değeri, 1 / C^2 -*V* grafik eğiminden hesaplandı. C_{FBS} değeri kullanılarak, C_{FB} seri kapasitans ilişkisinden elde edilebilir

$$C_{FB} = \frac{C_i C_{FBS}}{C_i + C_{FBS}} \quad (4.5)$$

V_{FB}, yüksek frekanslı *C-V* grafiklerinde C_{FB}'ye karşılık gelen gerilimdir ve grafiksel olarak, -1 V olarak belirlenmiştir. Bu değerler neticesinde etkin yük yoğunluk değeri HfO_2 filmleri için $2.3x10^{11}$ cm^{-2} olarak bulundu. Ayrıca HfO_2 dielektrik ince filmlerinin hesaplanan elektriksel parametrelerinin tümü Çizelge-I'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1 HfO_2 dielektrik filmlerin temel elektriksel parametreleri

λ- Debye l. (cm)	C_{FBS} (nF)	C_i (nF)	C_{FB} (nF)	V_{FB} (V)	ϕ_{ms} (eV)	ε_d	N_{eff} (cm^{-2})	V_{th} (V)
$7.1x10^{-6}$	4.58	7.7	2.8	-1	-0.85	14	$2.3x10^{11}$	-0.25

Elde edilen N_{eff} değerinin literatürle uyumlu hatta rapor edilen değerlerden daha iyi olduğu görülmüştür. Bu durum atomik katman biriktirme yönteminin ince filmleri büyütmek için oldukça uygun bir yöntem olduğunu doğrulamaktadır.

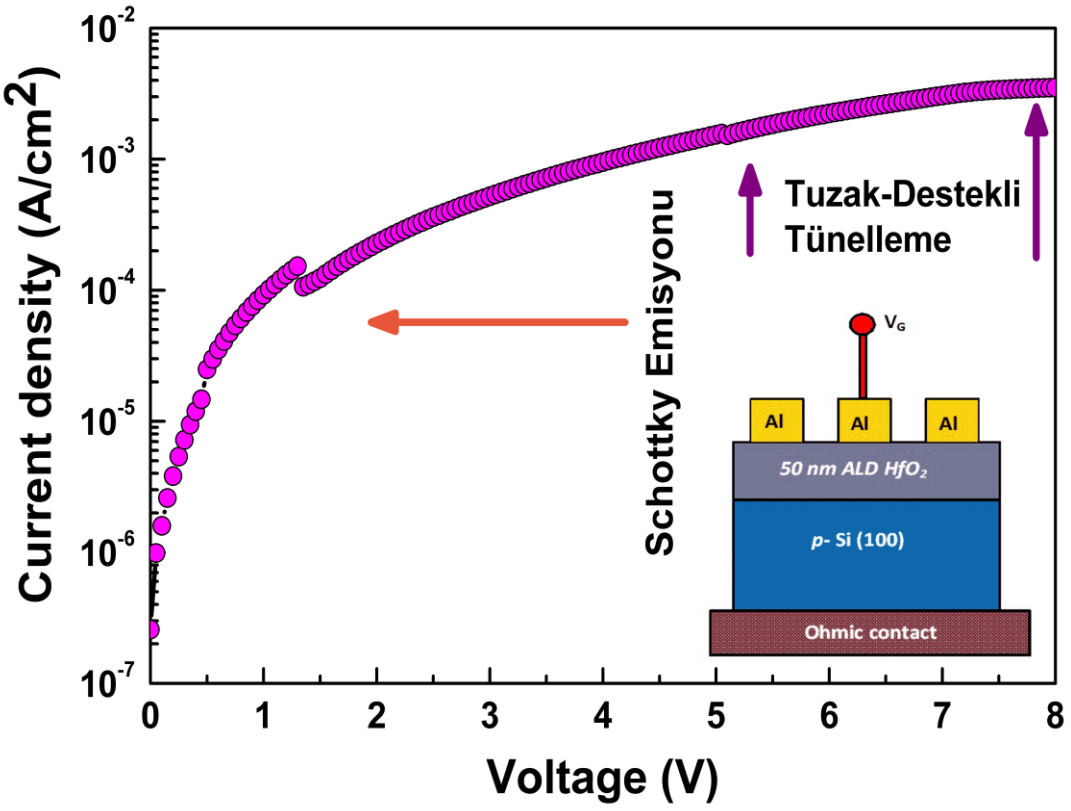
Diğer taraftan önemli bir elektriksel parametre olan eşik voltajı (Vth) değeri, kapasitör cihazlarının kuvvetli inversiyon bölgesi için şöyle hesaplanır;

$$V_{th} = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{(4q\varepsilon_{Si}\varepsilon_0 N_A|\psi_B|)^{1/2}}{\varepsilon_d\varepsilon_0/t_d} \quad (4.6)$$

Burada, where $\psi_B = (kT/q)\ln(\frac{N_A}{n_i})$ ve n_i oda sıcaklığında (yani, 1.45x10^{10} cm^{-3}) Si' nin asıl taşıyıcı yoğunluğudur. Bu parametreler kullanılarak eşik voltajı (V_{th}), -0.25 V olarak elde edildi.

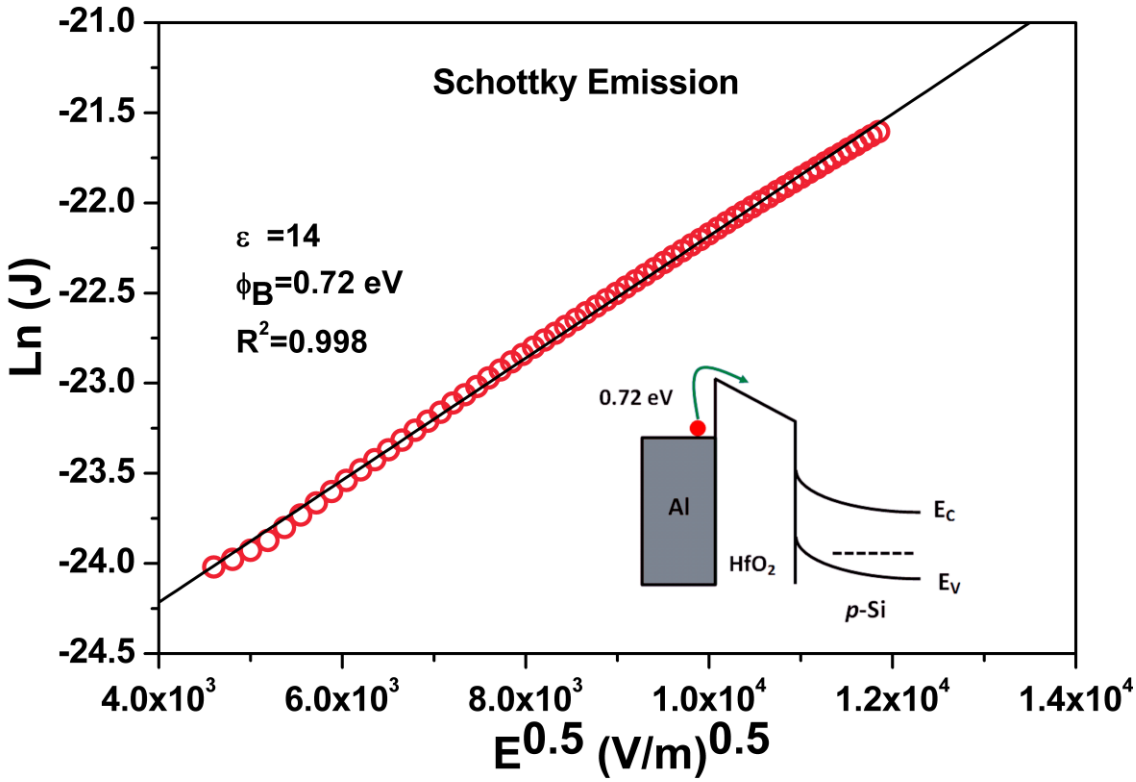
4.2. Akım-Voltaj (*I-V*) Karakteristikleri

Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapılarının elektriksel iletim meknizmalarını ortaya çıkarmak ve böylece sızıntı akımını analiz etmek üzere akım-voltaj (*I-V*) ölçümleri alınmış ve Şekil 4.3' te akım yoğunluğunun uygulanan voltaja bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapılarının *I-V* eğrisi

Şekil 4.3’ ten görüleceği üzere akım yoğunluğunun değişimi uygulanan voltaja veya uygulanan elektrik alana kuvvetlice bağlıdır ve *J-V* eğrisi üzerine farklı bölgeler bulunmaktadır. Bu durum elektriksel iletime neden olan iletim mekanizmalarının da uygulanan elektrik alana bağlı olduğunu göstermektedir. Dieleltrik film içerisindeki eleltriksel iletim mekanizlarını analiz etmek üzere, tezin metot kısmında ayrıntıları açıklanan iletim mekanizmaları ayrı ayrı önerilmiştir. Düşük elektrik alan bölgelerinde Ln(*J*) değerlerinin $E^{0.5}$ değerlerine göre grafiği oldukça yüksek bir doğrusal bağıntı gösterdiği bulunmuştur. Bu grafik Şekil 4.4’ te gösterilmiştir. Schottky emisyon eşitlikleri kullanılarak Ln(*J*) değerlerinin $E^{0.5}$ değerleri fit edilmiş dielektrik sabiti 14 olarak elde edilmiştir.

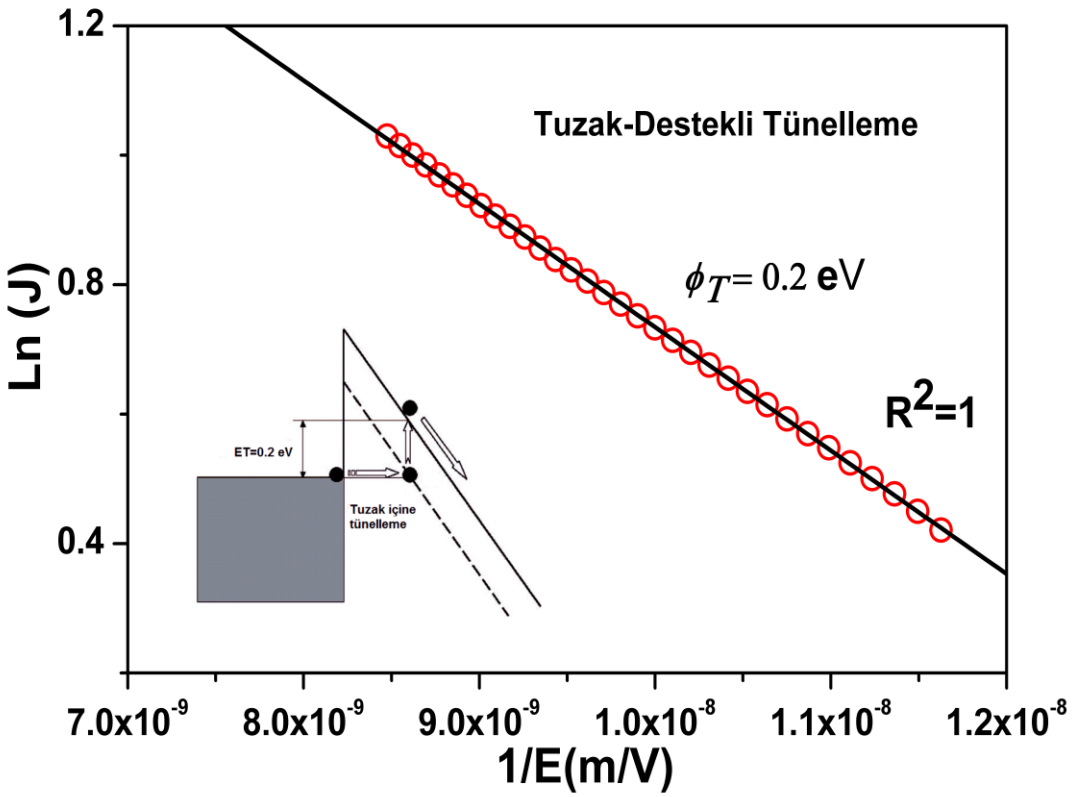


Şekil 4.4 Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapısında Schottky emisyon grafiği

Elde edilen dielektrik sabiti (14), Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapısının *C-V* ölçümlerinden elde edilen statik dielektrik sabitiyle birebir örtüştüğü görülmüştür. Bu durum göstermektedir ki, düşük elektrik alan bölgesinde elektriksel iletime neden olan

mekanizma Schottky emisyon mekanizmasıdır. Bu mekanizma, yeterli miktarda termal veya ısıl enerji kazanan elektronların metal-dielektrik arayüzeyinde oluşan enerji bariyerini aşarak metalden ayrılma mekanizması olarak tanımlanmıştır. Metal dielektrik arayüzeyinde oluşan bariyer yüksekliği ϕ_B ise 0.72 eV olarak hesaplanmıştır.

Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapılarına uygulanan voltaj değerinin yaklaşık olarak 4.9 V değerinden büyük olduğu durumda diğer bir ifadeyle yüksek elektrik alan bölgelerinde diğer elektriksel iletim mekanizmaları ölçülen değelerle fit edilmeye çalışıldı ve en iyi fit değeri tuzak-destekli tünelleme mekanizmasının bağıntısıyla elde edildi. Bu durumda Ln(J) değerlerinin $1/E$ değerlerine göre grafiği oldukça yüksek bir lineer davranış gösterdi. Bu durum Şekil 4.5' te gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Al/HfO_2/p-Si kapasitör yapısında Tuzak-destekli tünelleme grafiği

Yüksek elektrik alan bölgelerinde Poole-Frenkel emisyonu ve Fowler-Nordheim tünellemem mekanizmalarını içeren bağıntıları kullanıldığında lineer davranışlar görülmüştür. Ancak hesaplanan dielektrik sabitinin ve bariyer yüksekliğinin fit

değerlerinden elde edilen değerlerle uyum içerisinde olmamasından dolayı bu mekanizmalar elektriksel iletimde etkin rol oynamadıkları söylenebilir. Tuzak destekli tünelleme akım ifadesi şöyle verilebilir;

$$J_{TAT} \propto exp\left\{\frac{-8\pi\sqrt{2qm^*}}{3hE}\phi_T{}^{3/2}\right\} \tag{4.7}$$

Burada, m^* HfO_2 dielektrik materyali içerisindeki etkim kütle değeridir ve yaklaşık olarak 0.11 m_0 olarak ifade edilir. Bu bağıntının kullanılmasıyla tuzak seviyelerinin enerji değeri 0.2 eV olarak hesaplanmıştır. Yüksek elektrik alan altında bu tuzak seviyeleri elektriksel iletime katkıda bulunmaktadır.

Nguyen et al. (2005) Si alttaş üzerine kaplanan HfO_2 dielektrik filmlerde oluşan tuzak seviyeleri hakkında yayımladıkları çalışmada, 0.2-0.3 eV enerjili kusur veya tuzak seviyelerinin varlığını görmüşlerdir. Onlar bu kusur seviyelerinin, HfO_2 oksit film içerisinde metal (Hf) atomlarının d-band durumlarından kaynaklandıklarını ifade etmişlerdir. Diğer taraftan, Gavartin et al. (2006) HfO_2 içerisinde ve özellikle HfO_2 ile Si arayüzeyinde oluşan oksijen boşuklarının oluşturduğu kusurlarında tuzak seviyelerinin oluşumunda etkin rol oynadığını açıklamışlardır. Oksit yapılı dielektrik filmlerde oksijen boşlukları en sık rastlanılan yapısal kusur tipleridir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Metal-oksit-yarıiletekn (MOS) kapasitör yapıları çip ve transistör teknolojilerinin gelişmesinde çok önemli bir role sahip olan temel elektronik devre elemanlarıdır. Ancak bu devre elemanlarının minyatüre edilmesi ve çok küçük boyutlarda üretilmesi devrelerde artan bir sızıntı akımının oluşmasına neden olmaktadır. Sızıntı akımı elektronik devrelerin kararsızlığına ve güç kaybına neden olmaktadır. Bu yapılarda elektriksel akım iletim mekanizmalarının belirlenmesi, sızıntı akımına neden olan etkenlerin ortaya çıkarılarak bu akımın minimum seviyede tutulmasına imkan verecektir.

Oluşan bu sızıntı akımını olabildiğince düşük seviyelerde tutmak için geleneksel Silikon Dioksit (SiO_2) dielektrik malzemesi yerine çok daha yüksek dielektrik katsayısına sahip ve "high-*k* dielektrik" olarak adlandırılan Al_2O_3, Y_2O_3, HfO_2, GeO_2, ZrO_2 ve $SrTiO_3$ gibi alternatif malzemelerin kullanılmasına yönelik araştırmalar yoğun bir şekilde yapılmaktadır.

Bu çalışmada, HfO_2 dielektrik ince filmleri Si alttaşlar üzerine nispeten düşük büyütme sıcaklığında atomik katman biriktirme yöntemini kullanarak ve dielektrik film üzerine Al kapı elektrotları oluşturularak Al/HfO_2/p-Si MOS kapasitör yapıları üretildi. Üretilem MOS yapıların dielektriksel özelliklerini incelemek üzere kapasitans-voltaj (*C-V*) ölçümleri alındı ve HfO_2 filmin dielektrik katsayısı 14 olarak ve yapının etkin yük yoğunluk değeri $2.3x10^{11}$ cm^{-2} olarak hesaplandı. Elde edilen dielektrik sabiti ve etkin yük yoğunluk değerleri literatürle oldukça uyumlu olduğu, hatta etkin yük yoğunluğu değerinin pek çok çalışmaya göre daha iyi bir sonuç olduğu görüldü. Örneğin, Kim et al. (2005) tarafından yayımlanan çalışmada moleküler demet epitaksi yöntemi ile ürettikleri HfO_2 dielektrik filminde etkin yük yoğunluğunu $8x10^{11}$ cm^{-2} olarak elde etmişlerdir. Zhu ve arkadaşları tarafından yayımlanan çalışmada arayüzey tuzak durum yoğunluk değerini 10^{12} cm^{-2} mertebesinde bulmuşlardır.

Diğer taraftan, Al/HfO_2/p-Si MOS kapasitör yapılarında elektriksel akım iletim mekanizmalarını analiz etmek için akım-voltaj (*I-V*) ölçümleri alındı ve akım yoğunluğunun dielektrik üzerine uygulanan elektrik alanın kuvvetlice bir fonksiyonu olarak değiştiği bulundu. Bu durum farklı elektrik alan bölgelerinde farklı tip akım-

iletim mekanizmalarının geçerli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle düşük şiddetteki elektrik alan ve yüksek şiddetdeki elektrik alan değerlerinde akım iletim mekanizmaları analiz edildi. Düşük elektrik alan bölgelerinde Ln(J) değerlerinin $E^{1/2}$ değerlerine göre grafiği oldukça lineer bir bağıntı gösterdiği ve Schottky emisyon bağıntısı kullanılarak elde edilen dieletrik sabitinin statik dielektrik sabitiyle mükemmel bir uyum içinde hesaplandığı görüldü. Bu durum üretilen Al/HfO_2/p-Si MOS kapasitör yapılarında düşük elektrik alan bölgesinde elektriksel akım iletimin Schottky emisyon mekanizması aracılığıyla olduğunu kanıtlamaktadır. Dolayısıyla düşük elektrik alan bölgelerinde elektrot kaynaklı akım iletim mekanizmaları Al/HfO_2/p-Si MOS kapasitör yapılarında akım iletim olayında etkin rol oynamaktadırlar. Bu mekanizmada termal bir enerjiye sahip olan elektronlar dielektrik film üzerine uygulanan elektrik alan yardımıyla metal-dielektrik arasında oluşan bariyer yüksekliğini aşarak iletim bandına geçer ve elektriksel iletime katkıda bulunurlar. Bu çalışmada elde edilen bariyer yüksekliği 0.72 eV değerindedir.

Yüksek elektrik alan bölgesinde, elektriksel akım iletim mekanizmalarını analiz etmek için diğer tip akım iletim mekanizları önerilmiştir. Poole-Frenkel emisyon mekanizması ve Fowler-Nordheim tünelleme mekanizmaları ölçüm değerleriyle lineer bir bağıntı göstermiş ancak elde edilen dielektrik sabiti ve bariyer yükseklik değerleri teorik değerlerle uyuşmamıştır. Diğer taraftan ve en iyi fit değeri tuzak-destekli tünelleme mekanizmasının bağıntısıyla elde edilmiştir. Bu durumda Ln(J) değerlerinin 1/E değerlerine göre grafiği oldukça yüksek bir lineer davranış göstermiştir. Bu mekanizmanın ifadesi kullanılarak 0.2 eV değerine sahip tuzak seviyeleri hesaplanmıştır. Dolayısıyla yüksek elektrik alan bölgelerinde dielektrik içerisinde bulunan tuzaklar taşıyıcılar için birer basamak görevi görmekte ve tuzaklara tünelleme yapan elektronlar elektrik alan aracılığıyla tuzaklardan uyarılıp iletim bandına geçerek elektriksel iletimde rol oynamaktadırlar. Bu tuzak seviyelerinin ortadan kaldırılması yüksek elektrik alan bölgelerinde Al/HfO_2/p-Si MOS kapasitör yapılarında oluşan sızıntı akımını minimum seviyeye düşürecektir.

Bu çalışmada, HfO_2 dielektrik filmleri üretmek için atomik katman biriktirme yöntemi kullanılmıştır. Ve filmler kaplama işlemi sonrası herhangi bir ısıl tavlama işlemine maruz bırakılmamıştır. Bu yöntem dielektrik filmlerin düşük sıcaklıklarda

büyütülmesine imkan vermekte ve kendini limitleyen bir büyütme mekanizmasına sahip olması nedeniyle mükemmel derecede filmlerin kalınlık ve homojenite kontrolünü sağlamaktadır. Üretilen filmlerde 8 V beslem voltajına kadar değer uygulanmış ve herhangi bir kırılma eğrisi gözlemlenmemiştir. Bu durum göstermektedir ki, atomik katman biriktirme yöntemi, dielektrik filmlerin düşük sıcaklıklarda yüksek kalitede büyütülmesinde kullanım potansiyeli oldukça yüksek olan ve gelecekte daha da artan bir potansiyele sahip olacaktır.

KAYNAKLAR

Ali, F.Z., Liu, X.H., Zhou, D.Y., Yang, X.R., Xu, J., Schenk, T., Muller, J., Schroeder, U., Cao, F., Dong, X.L., 2017. Silicon-doped hafnium oxide anti-ferroelectric thin films for energy storage. J. Appl. Phys., 122, 7.

Assaud, L., Pitzschel, K., Barr, M.K.S., Petit, M., Monier, G., Hanbucken, M., Santinacci, L., 2017. Atomic layer deposition of HfO2 for integration into three-dimensional metal-insulator-metal devices. Appl. Phys. A-Mater. Sci. Process., 123, 7.

Botzakaki, M.A., Skoulatakis, G., Kennou, S., Ladas, S., Tsamis, C., Georga, S.N., Krontiras, C.A., 2016. The impact of ultrathin Al2O3 films on the electrical response of p-Ge/Al2O3/HfO2/Au MOS structures. J. Phys. D-Appl. Phys., 49, 12.

Cheng, Z.X., Liu, L., Xu, J.P., Huang, Y., Lai, P.T., Tang, W.M., 2016. Impact of Nitrogen Incorporation on the Interface Between Ge and La2O3 or Y2O3 Gate Dielectric: A Study on the Formation of Germanate. IEEE Trans. Electron Devices, 63, 4888-4892.

Chiu, F.-C., 2014. A review on conduction mechanisms in dielectric films. Advances in Materials Science and Engineering, 2014.

Dugu, S., Pavunny, S.P., Scott, J.F., Katiyar, R.S., 2016. Si:SrTiO3-Al2O3-Si:SrTiO3 multi-dielectric architecture for metal-insulator-metal capacitor applications. Applied Physics Letters, 109, 5.

Edy, R., Huang, G.S., Zhao, Y.T., Guo, Y., Zhang, J., Mei, Y.F., Shi, J.J., 2017. Influence of reactive surface groups on the deposition of oxides thin film by atomic layer deposition. Surf. Coat. Technol., 329, 149-154.

Esakky, P., Kailath, B.J., 2017. Improvement on the electrical characteristics of Pd/HfO2/6H-SiC MIS capacitors using post deposition annealing and post metallization annealing. Appl. Surf. Sci., 413, 66-71.

Fadida, S., Nyns, L., Van Elshocht, S., Eizenberg, M., 2017. Effect of Remote Oxygen Scavenging on Electrical Properties of Ge-Based Metal-Oxide-Semiconductor Capacitors. J. Electron. Mater., 46, 386-392.

Gao, J., He, G., Zhang, J.W., Deng, B., Liu, Y.M., 2015. Annealing temperature modulated interfacial chemistry and electrical characteristics of sputtering-derived HfO2/Si gate stack. J. Alloy. Compd., 647, 322-330.

Gavartin, J.L., Ramo, D.M., Shluger, A., Bersuker, G., 2006. Polaron-like charge trapping in oxygen deficient and disordered HfO2: theoretical insight. ECS Transactions, 3, 277-290.

Gope, J., Vandana, Batra, N., Panigrahi, J., Singh, R., Maurya, K.K., Srivastava, R., Singh, P.K., 2015. Silicon surface passivation using thin HfO2 films by atomic layer deposition. Appl. Surf. Sci., 357, 635-642.

Han, F.F., Ren, S.K., Deng, J.M., Yan, T.X., Ma, X., Peng, B.L., Liu, L.J., 2017. Dielectric response mechanism and suppressing high-frequency dielectric loss in Y2O3 grafted CaCu3Ti4O12 ceramics. J. Mater. Sci.-Mater. Electron., 28, 17378-17387.

Hattori, M., Oshima, T., Wakabayashi, R., Yoshimatsu, K., Sasaki, K., Masui, T., Kuramata, A., Yamakoshi, S., Horiba, K., Kumigashira, H., Ohtomo, A., 2016. Epitaxial growth and electric properties of gamma-Al_2O_3(110) films on beta-Ga2O3(010) substrates. Jpn. J. Appl. Phys., 55, 5.

Hosoi, T., Hideshima, I., Tanaka, R., Minoura, Y., Yoshigoe, A., Teraoka, Y., Shimura, T., Watanabe, H., 2013. Ge diffusion and bonding state change in metal/high-k/Ge gate stacks and its impact on electrical properties. Microelectron. Eng., 109, 137-141.

Hudait, M.K., Zhu, Y., 2013. Energy band alignment of atomic layer deposited HfO2 oxide film on epitaxial (100)Ge, (110)Ge, and (111)Ge layers. J. Appl. Phys., 113, 6.

Jin, C.J., Lu, H.L., Zhang, Y.M., Guan, H., Li, Z., Zhang, Y.M., 2016. Study on reverse-biased gate leakage current mechanisms in Al2O3/InAlAs metal-oxide-semiconductor structures. Thin Solid Films, 619, 48-52.

Kim, M.-S., Ko, Y.-D., Yun, M., Hong, J.-H., Jeong, M.-C., Myoung, J.-M., Yun, I., 2005. Characterization and process effects of HfO_2 thin films grown by metal-organic molecular beam epitaxy. Materials Science and Engineering: B, 123, 20-30.

Kubo, T., Egawa, T., 2017. Electrical characteristics and interface properties of ALD-HfO2/AlGaN/GaN MIS-HEMTs fabricated with post-deposition annealing. Semicond. Sci. Technol., 32, 5.

Kumar, A., Mondal, S., Rao, K., 2016. Structural, electrical, band alignment and charge trapping analysis of nitrogen-annealed Pt/HfO2/p-Si (100) MIS devices. Appl. Phys. A-Mater. Sci. Process., 122, 8.

Lei, Z.C., Goh, K.H., Abidin, N.I.Z., Wong, Y.H., 2017. Effect of oxidation temperature on physical and electrical properties of ZrO2 thin-film gate oxide on Ge substrate. Thin Solid Films, 642, 352-358.

Liu, H.S., Jiang, Y.G., Wang, L.S., Li, S.D., Yang, X., Jiang, C.H., Liu, D.D., Ji, Y.Q., Zhang, F., Chen, D.Y., 2017. Effect of heat treatment on properties of HfO2 film deposited by ion-beam sputtering. Opt. Mater., 73, 95-101.

Maity, N.P., Maity, R., Baishya, S., 2017. Voltage and oxide thickness dependent tunneling current density and tunnel resistivity model: Application to high-k material HfO2 based MOS devices. Superlattices Microstruct., 111, 628-641.

Mazur, M., Poniedzialek, A., Kaczmarek, D., Wojcieszak, D., Domaradzki, J., Gibson, D., 2017. Investigation of various properties of HfO2-TiO2 thin film composites deposited by multi-magnetron sputtering system. Appl. Surf. Sci., 421, 170-178.

McDaniel, M.D., Ngo, T.Q., Hu, S., Posadas, A., Demkov, A.A., Ekerdt, J.G., 2015. Atomic layer deposition of perovskite oxides and their epitaxial integration with Si, Ge, and other semiconductors. Appl. Phys. Rev., 2, 32.

Nguyen, N.V., Davydov, A.V., Chandler-Horowitz, D., Frank, M.M., 2005. Sub-bandgap defect states in polycrystalline hafnium oxide and their suppression by admixture of silicon. Applied Physics Letters, 87, 192903.

Ondracka, P., Holec, D., Necas, D., Zajickova, L., 2016. Accurate prediction of band gaps and optical properties of HfO2. J. Phys. D-Appl. Phys., 49, 8.

Patil, V.S., Agrawal, K.S., Khairnar, A.G., Thibeault, B.J., Mahajan, A.M., 2016. Structural and electrical properties of ultra-thin high-k ZrO2 film on nitride passivated Ge(100) prepared by PEALD. Mater. Sci. Semicond. Process, 56, 277-281.

Salomone, L.S., Lipovetzky, J., Carbonetto, S.H., Inza, M.A.G., Redin, E.G., Campabadal, F., Faigon, A., 2016. Deep electron traps in HfO2-based metal-oxide-semiconductor capacitors. Thin Solid Films, 600, 36-42.

Sementa, L., Larcher, L., Barcaro, G., Montorsi, M., 2017. Ab initio modelling of oxygen vacancy arrangement in highly defective HfO_2 resistive layers. Phys. Chem. Chem. Phys., 19, 11318-11325.

Shakhova, I., Mironov, E., Azarmi, F., Safonov, A., 2017. Thermo-electrical properties of the alumina coatings deposited by different thermal spraying technologies. Ceram. Int., 43, 15392-15401.

Shevjakov, A., Kuznetsova, G., Aleskovskii, V., 1965. Chemistry of high temperature materials, Proceedings of the second USSR conference on high-temperature chemistry of oxides, Leningrad, USSR, pp. 26-29.

Sokolov, A.S., Son, S.K., Lim, D., Han, H.H., Jeon, Y.R., Lee, J.H., Choi, C., 2017. Comparative study of Al_2O_3, HfO_2, and $HfAlO_x$ for improved self-compliance bipolar resistive switching. J. Am. Ceram. Soc., 100, 5638-5648.

Srivastava, D., Norman, C., Azough, F., Schafer, M.C., Guilmeau, E., Kepaptsoglou, D., Ramasse, Q.M., Nicotra, G., Freer, R., 2016. Tuning the thermoelectric properties of A-site deficient SrTiO3 ceramics by vacancies and carrier concentration. Phys. Chem. Chem. Phys., 18, 26475-26486.

Suntola, T., Antson, J., 1977. Method for producing compound thin films. Google Patents.

Sze, S.M., Ng, K.K., 2006. Physics of semiconductor devices. John wiley & sons.

Traore, B., Blaise, P., Vianello, E., Grampeix, H., Jeannot, S., Perniola, L., De Salvo, B., Nishi, Y., 2015. On the Origin of Low-Resistance State Retention Failure in HfO2-Based RRAM and Impact of Doping/Alloying. IEEE Trans. Electron Devices, 62, 4029-4036.

Von Hippel, A.R., 1954. Dielectrics and waves.

Xiao, M.M., Qiu, C.G., Zhang, Z.Y., Peng, L.M., 2017. Atomic-Layer-Deposition Growth of an Ultrathin HfO2 Film on Graphene. ACS Appl. Mater. Interfaces, 9, 34050-34056.

Xu, X.F., Jiang, L.M., Zhou, Y.C., 2017. Reduction of leakage currents in ferroelectric thin films by flexoelectricity: a phase field study. Smart Mater. Struct., 26, 15.

Zhang, L.M., Shang, J.M., Cai, G.W., 2017. Indium passivation impact on HfO2/GaAs interface: A first-principles study. Mod. Phys. Lett. B, 31, 10.

Zhang, Y., Xu, J., Wang, Y.N., Choi, C., Zhou, D.Y., Choi, C.K., Zhou, D.Y., 2016. Facing-target mid-frequency magnetron reactive sputtered hafnium oxide film: Morphology and electrical properties. J. Korean Phys. Soc., 68, 679-685.

Zhu, W., Ma, T., Zafar, S., Tamagawa, T., 2002. Charge trapping in ultrathin hafnium oxide. IEEE Electron Device Letters, 23:597-599.

Zimmermann, C., Bethge, O., Lutzer, B., Bertagnolli, E., 2016. Platinum-assisted post deposition annealing of the n-Ge/Y2O3 interface. Semicond. Sci. Technol. 31, 8.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abdulsamed KAYA

Doğum Yeri : Elazığ

Doğum Tarihi : 21/06/1990

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Adres : Abdulhalik Renda Mah. Zafer Cad. Canlar Sitesi B Blok No:13 Kat:4 Merkez/ÇANKIRI

Tel : (0539) 432 60 92

E-Posta : 23abdulsamed@gmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Korgeneral Hulusi Sayın Lisesi 2007

Lisans : Fırat Üniversitesi 2012

Yüksek Lisans : Çankırı Karatekin Üniversitesi 2014-Devam ediyor.

Çalıştığı Kurum ve Yıl: Çankırı Karatekin Üniversitesi 2012-Devam ediyor.

Akademik Çalışmalar

1. A. Kaya, H. Altuntas, "Frequency dependent interface states in HfO_2 dielectric films*", International Congress on Semiconductor Materials and Devices (ICSMD-2017),* Konya, TURKEY (2017).

2. H. Altuntas, A. Kaya, "Electrical conduction mechanisms in HfO_2 dielectric films deposited by thermal atomic layer deposition*", International Congress on Semiconductor Materials and Devices (ICSMD-2017),* Konya, TURKEY (2017).

3. H. Altuntas, A. Kaya, "Electrical characteristics of atomıc layer deposited HfO_2 dielectric films*", International Congress on Semiconductor Materials and Devices (ICSMD-2017),* Konya, TURKEY (2017).

4. H. Altuntas, A. Kaya, "Dielectrical properties of HfO_2 dielectric films*", International Congress on Semiconductor Materials and Devices (ICSMD-2017),* Konya, TURKEY (2017).