



**SILAR YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Cd KATKILI ZnO İNCE FİMLERİN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Buket TURAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Buket TURAN
26/10/2022

SILAR YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Cd KATKILI ZnO İNCE FİLMLERİN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Buket TURAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2022

ÖZET

Bu çalışmada ZnO solüsyonuna kütlece %5 ve %10 oranında Cd katkı yapılarak, cam üzerinde SILAR yöntemi ile katkısız ve katkılı ince filmler üretildi. Üretilen ince filmlerin x ışını kırınım cihazı ve taramalı elektron mikroskobu ile yapısal karakterizasyonu yapıldı. İnce filmlerin oda sıcaklığında, 3 kHz-1,5 MHz frekans aralığında, 0-5 V arası 1 V aralıklarla kapasitans (C-f) ve iletkenlik (G-f) ölçümleri alındı. Bu değerler kullanılarak empedans (Z), empedansın reel (Z'), imajiner kısımları (Z'') ve seri direnç (R_s) değerleri hesaplandı. Elde edilen sonuçlarda, katkı oranı arttıkça kapasitans ve iletkenlik değerlerinin arttığı; Z, Z' ve Z'' değerlerinin ise katkı oranı arttıkça artarken, artan frekans ile azaldığı bulundu. R_s değerlerinin hem katkı oranına hem de artan frekansa bağlı olarak azaldığı görüldü.

Bilim Kodu : 11402
Anahtar Kelimeler : Yarıiletken, ZnO, Kadmiyum, Empedans
Sayfa Adedi : 69
Danışman : Prof. Dr. Şükrü ÇAVDAR

INVESTIGATION OF ELECTRICAL PROPERTIES OF Cd DOPED ZnO THIN FILMS
PRODUCED BY SILAR METHOD

(M. Sc. Thesis)

Buket TURAN

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2022

ABSTRACT

Pure and 5% and 10% by weight Cd doped ZnO thin films on glass were coated using the SILAR method. Structural characterization of thin films were done with X-ray diffractometer and scanning electron microscope. Capacitance (C-f) and conductance (G-f) values of thin films were measured in 1 V steps between 0-5 V, frequency range of 1 kHz-1.5 MHz, at room temperature. Using these values, impedance (Z), real (Z') and imaginary (Z'') parts of impedance and series resistance (R_s) values were calculated. According to the obtained results, as the doping ratio increased, the capacitance and conductance values increased; It was found that Z, Z' and Z'' values increased as the doping ratio increased, but decreased with increasing frequency. It was seen that the values of R_s decreased depending on both the doping rate and the increasing frequency.

Science Code : 11402
Key Words : Semiconductor, ZnO, Cadmium, İmpedance
Page Number : 69
Supervisor : Prof. Dr. Şükrü ÇAVDAR

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca deneyimleri ile beni yönlendiren ve yardımlarını esirgemeyen, danışman hocam Prof. Dr. Şükrü ÇAVDAR'a teşekkür ederim. Yorum ve önerileri ile çalışmalarına katkıları bulunan hocalarım, Prof. Dr. Haluk KORALAY, Prof. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU, Öğr. Gör. Dr. Neslihan TURAN ve Prof. Dr. Selim ACAR'a, deneysel çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen laboratuvar arkadaşlarım Yeşim DEMİRÖLMEZ, Ayten ARSLAN, Arş. Gör. Pınar ORUÇ, Yusuf ÖZNAL ve Selçuk İZMİRLİ'ye teşekkür ederim. Bu günlere gelmemde çok büyük emeği olan, her zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen canım annem Birgül GÜMÜŞ'e, sevgili kardeşim Burak GÜMÜŞ'e ve sevgili arkadaşım Gizem KOLCU'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER	3
2.1. Yarıiletkenler.....	3
2.1.1. Saf yarıiletkenler	4
2.1.2. Katkılı yarıiletkenler	5
2.2. İnce Film Büyütme Teknikleri	8
2.2.1. Sol-jel üretim yöntemi	9
2.2.2. Ardışık iyonik tabaka absorpsiyonu ve reaksiyonu	11
2.3. Çinko oksit	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM	15
3.1. Analiz Yöntemleri.....	15
3.1.1. X ışını kırınım tekniği	15
3.1.2. Taramalı elektron mikroskobu	16
3.1.3. Elektriksel karakterizasyon	18
3.2. İnce Filmlerin Üretimi.....	19
3.2.1. Alttaşların hazırlanması	19

	Sayfa
3.2.2. Kadmiyum katkılı ZnO ince filmlerin hazırlanması	20
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	23
4.1. CZ0, CZ5 ve CZ10 İnce Filmlerinin XRD Analizleri	23
4.2. CZ0, CZ5 ve CZ10 İnce Filmlerinin SEM Analizleri.....	25
4.3. CZ0, CZ5 ve CZ10 İnce Filmlerinin Elektriksel Karakterizasyonu	27
4.3.1. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin farklı voltajlarda kapasitans frekans karakteristikleri	28
4.3.2. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin farklı voltajlarda iletkenlik frekans karakteristikleri	31
4.3.3. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin farklı voltajlarda seri direnç-frekans karakteristikleri	35
4.3.4. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin farklı voltajlarda empedans frekans karakteristikleri	39
4.3.5. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin farklı voltajlarda empedansın gerçel kısmının frekansa bağlı karakteristikleri	44
4.3.6. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin farklı voltajlarda empedansın sanal kısmının frekansa bağlı karakteristikleri	48
4.3.7. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin 4V Nyquist eğrileri.....	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. CZ0, CZ5, CZ10 ince filmlerinin XRD analizi	24
Çizelge 4.2. ZView ile fit edilen devre modeliyle hesaplanan devre elemanlarının parametreleri	57

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yarıiletkenlerde enerji bant diyagramları	4
Şekil 2.2. Saf yarı iletkenlerde (a) $T=0K$ ve (b) $T>0K$ sıcaklarda bant yapısı	5
Şekil 2.3. n-tipi yarıiletken, P katkılı Si kristalinin iki boyutlu gösterimi	6
Şekil 2.4. n-tipi yarıiletken enerji bant diyagramı	7
Şekil 2.5. p-tipi yarıiletken, B katkılı Si kristali iki boyutlu gösterimi.....	7
Şekil 2.6. p-tipi yarıiletkenlerin enerji bant diyagramı	8
Şekil 2.7. İnce film üretim yöntemleri	9
Şekil 2.8. Sol-jel yöntemi üretim basamakları.....	10
Şekil 2.9. SILAR döngüsü şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.10. ZnO kristal yapıları a) Kaya tuzu b) Zinc blende c) Vürtzit	12
Şekil 3.1 X ışını kırınımı.....	16
Şekil 3.2. SEM şematik gösterimi.....	17
Şekil 3.3. İnce filmlerin üretim aşamasının şematik gösterimi.....	21
Şekil 4.1. CZ, CZ5, CZ10 ince filmlerinin XRD deseni.....	23
Şekil 4.2. (c) CZ10 ince filminin 2,5k büyütmedeki SEM görüntüsü	27
Şekil 4.3. CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında kapasitans frekans grafiği.	28
Şekil 4.4. CZ5 ince filminin farklı bias voltajlarında kapasitans frekans grafiği.	29
Şekil 4.5. CZ10 ince filminin farklı bias voltajlarında kapasitans frekans grafiği.	30
Şekil 4.6. 4V bias voltajı altında CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin kapasitans frekans grafiği.....	31
Şekil 4.7. CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında iletkenlik frekans grafiği.....	32
Şekil 4.8. CZ5 ince filminin farklı bias voltajlarında iletkenlik frekans grafiği.....	33
Şekil 4.9. CZ10 ince filminin farklı bias voltajlarında iletkenlik frekans grafiği.....	34
Şekil 4.10. 4V bias voltajı altında CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin iletkenlik frekans grafiği.....	35
Şekil 4.11. CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında seri direnç frekans grafiği.	36

Şekil	Sayfa
Şekil 4.12. CZ5 ince filminin farklı bias voltajlarında seri direnç-frekans grafiği.....	37
Şekil 4.13. CZ10 ince filminin farklı bias voltajlarında seri direnç frekans grafiği.	38
Şekil 4.14. 4V bias voltajında CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin seri direnç frekans grafiği (a) 4V bias voltajında CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin seri direnç frekans grafiği.....	39
Şekil 4.15. CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında empedans frekans grafiği.....	41
Şekil 4.16. CZ5 ince filminin farklı bias voltajlarında empedans frekans grafiği.....	42
Şekil 4.17. CZ10 ince filminin farklı bias voltajlarında empedans frekans grafiği.....	43
Şekil 4.18. 4V bias voltajında CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin empedans frekans grafiği. (a) 4V bias voltajında CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin empedans frekans grafiği.....	44
Şekil 4.19. CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında $Z'-f$ grafiği.	45
Şekil 4.20. CZ5 ince filminin farklı bias voltajlarında $Z'-f$ grafiği	46
Şekil 4.21. CZ10 ince filminin farklı bias voltajlarında $Z'-f$ grafiği	47
Şekil 4.22. 4V bias voltajında CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin $Z'-f$ grafiği (a) 4V bias voltajında CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin $Z'-f$ frekans grafiği....	48
Şekil 4.23. CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında $Z''-f$ grafiği.	49
Şekil 4.24. CZ5 ince filminin v farklı bias voltajlarında $Z''-f$ grafiği.	50
Şekil 4.25. CZ10 ince filminin farklı bias voltajlarında $Z''-f$ grafiği.	51
Şekil 4.26. 4V bias voltajında CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin $Z''-f$ grafiği (a) 4V bias voltajında CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin $Z''-f$ frekans grafiği...	52
Şekil 4.27. Z0 ince filminin $Z''-Z'$ grafiği.	53
Şekil 4.28. CZ5 ince filminin $Z''-Z'$ grafiği.....	54
Şekil 4.29. CZ10 ince filminin $Z''-Z'$ grafiği.....	55
Şekil 4.30. CZ0, CZ5 ve CZ10 için ince filminin devre modeli.....	56

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1 Rigaku MiniFlex II marka XRD analiz cihazı	16
Resim 3.2. Taramalı elektron mikroskobu.....	18
Resim 3.3. Nyquist grafiği	19
Resim 3.4. Empedans analizörü cihazı	19
Resim 3.5. (a) Termal buharlaştırma işlemi sırasında, (b) Termal buharlaştırma işleminden sonra numunelerin resmi	21

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

C	Kapasitans
E_c	İletkenlik Bandı
E_f	Fermi enerjisi
E_g	Yasak enerji aralığı
E_v	Değerlik Bandı
G	İletkenlik
Z	Empedans

Kısaltmalar

Açıklamalar

CSP	Kimyasal Püskürtme
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
PLD	Atımlı Lazer Kaplama
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SILAR	Ardışık İyonik Tabaka Absorpsiyonu ve Reaksiyonu
TEM	Taramalı tünelleme mikroskobu
XRD	X Işını difraksiyonu

1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemeler, özdirenci 10^{-2} - $10^9 \Omega \text{ cm}$ aralığında yer alan ayrıca yaklaşık yasak enerji aralığı 4 eV'dan daha az değere sahip olması ile tanımlanır. Yarıiletken teknolojisi çalışmalarının ilgi çekmesinin en büyük nedeni endüstride geniş kapsamlı, ucuz ve pratik uygulamalar olmasıdır. Güneş pillerinden gaz sensörlerine, foto katotlardan transistör uygulamaları gibi birçok alanda çalışmalar geçmişten günümüze devam etmektedir (Kasik ve diğerleri, 2008). Yarıiletkenler, saf olarak gruplandırılmasının yanı sıra yapılarında safsızlık bulunan yarıiletkenler başka bir gruptaki elementler ile katkılanarak yarıiletken özelliği göstermesi ve elektriksel özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanır. Bu durum katkılı yarıiletkenleri ortaya çıkarır.

Çinko oksit (ZnO) oldukça önemli katkılı yarıiletken bileşiklerden biridir. ZnO nadir toprak elementleri ile geçiş metallerinin katkısı sonucunda oluşan yapılardır. ZnO periyodik tabloda II-IV grup yarıiletkenlerinden biri olup, elektriksel özelliği bakımından 3,3 eV yasak enerji bant aralığı ile yüksek iletkenliğe sahiptir (Podia ve Tripathi, 2022). Zehirli bir malzeme olmayan ZnO ucuz ve yaygın bulunan bir yarı iletken çeşididir. Nano çubuk, nano tel ve nano parçacık şeklinde birçok yapıda üretilen ZnO aynı zamanda ince film olarak da sıkça kullanılmaktadır. ZnO ince filmler, kimyasal buhar biriktirme (CVD), atımlı lazer kaplama (PLD), kimyasal püskürtme (CSP), ardışık iyonik tabaka absorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) ve sol jel yöntemi gibi birçok yöntemle üretilmektedir. Bu tez çalışmasında ZnO yarıiletkenin kullanılma sebebi düşük maliyet, kolay üretim ve yüksek elektriksel özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. ZnO ve ZnO'e katkılanarak oluşturulan yarı iletkenler özellikle şeffaf yapıda olmaları sayesinde günümüzde şeffaf yarıiletken, sensör, katalizör uygulamalarında ve birçok farklı alanda sıkça kullanılmaktadır (Hoffman ve diğerleri, 2003; Klingshirn, 2007; Look ve diğerleri, 1998).

ZnO'un bu özellikleri sayesinde birçok nadir toprak elementleri ile katkılama yapılarak elektriksel özelliklerindeki değişimler literatürde sıkça incelenmektedir. Özellikle kobalt, titanyum, magnezyum ve kadmiyum gibi elementler katkılanarak ZnO üzerinde meydana getirilen etkileri incelenmiştir (Huang ve diğerleri, 2012; Lin ve diğerleri, 2015; Oruç ve diğerleri, 2021; Piprek, 2003; Turan ve diğerleri, 2021).

Kadmiyum (Cd) IIB grubunda yer alan kokusuz, toksik özelliklere sahip olan endüstride yaygın olarak pil ve akülerde kullanılan bir elementtir. Kapasitif özelliği oldukça yüksek olan Cd günümüzde optoelektronik cihazların yapımında da sıkça kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında Cd kullanılması'nın sebebi elektro kimyasal empedans spektroskopisinde yüksek kapasitif özelliğe sahip olan pil benzeri yapıların incelenmesi açısından ZnO'ya katkısıdır (Guzmán-Embús ve diğerleri, 2015; Jule ve diğerleri, 2016; Kayani, Iram ve diğerleri, 2018; Li ve diğerleri, 2011; Mahmoud ve Al-Sanoosi, 2012; Maiti ve diğerleri, 2007).

Bu tez çalışmasında Cd belirli oranlarda ZnO'ya katkılanarak SILAR metodu ile ince filmler üretilmiştir. Saf ve katkılı olarak üretilen ince filmlerin farklı voltajlarda, frekansa bağlı kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinden faydalanılarak seri direnç, empedans ve empedans bileşenlerinin hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar ve ölçümler sonucunda üretilen ZnO ince filmlere Cd katkısının etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. SILAR yöntemi ile üretilen katkısız ZnO, %5 ve %10 Cd katkılı ZnO ince filmler sırası ile CZ0, CZ5 ve CZ10 olarak isimlendirilmiştir. Bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm bu çalışmanın içeriği ve amacı hakkında bilgi vermektedir. İkinci bölüm yarı iletkenler ve çeşitleri, üretim yöntemleri ve kullanılan malzemeler hakkında bilgiler içermektedir. Üçüncü bölüm CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerin üretim yöntemleri ve kullanılan analizler yöntemleri hakkında bilgi içermektedir. Dördüncü bölümde ölçüm değerlerinden yola çıkılarak hesaplanan parametrelerin grafikleri ve grafiklerin yorumlarını içermektedir. Beşinci bölümde ise deneysel sonuçlar özetlenerek elde edilen sonuçlar üzerine tartışılmıştır.

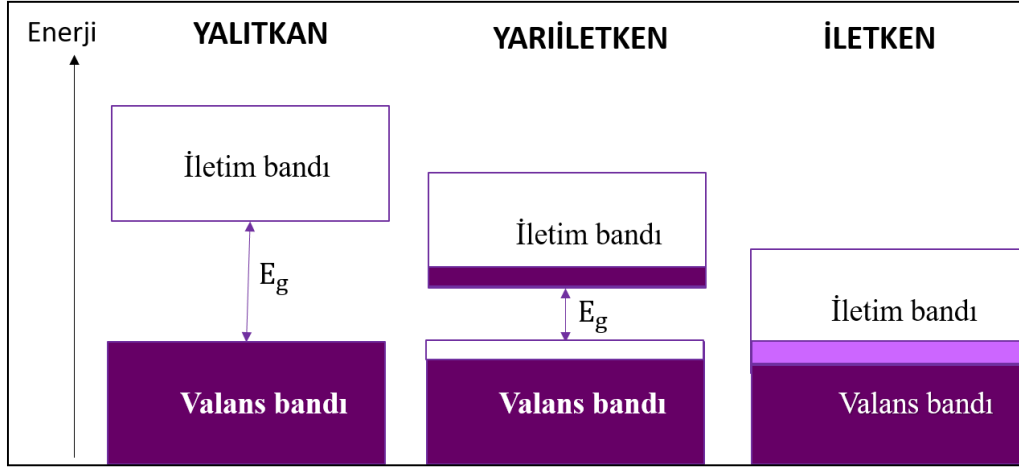
2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Yarıiletkenler

Yarıiletken teknolojisi 1974 yılında metal yarıiletken kontaklar arasındaki elektriksel iletimi inceleyen Raun'nun ilk çalışmalarına kadar uzanır. Bu çalışmalarda negatif sıcaklık katsayı direnci, doğrultma, ışık duyarlılığı özellikleri bahsedilmiştir. Yirminci yüzyılın başlarında kuantumdaki gelişmeler dedektörler, entegre devreler ve transistörlerin gelişmesine katkı sağlamıştır. Yirmi birinci yüzyıl teknolojisi yeni malzemelerin ve yapıların üretilmesine olanak sağlarken yarı iletkenler, fotovoltaiik piller, ışık yayan diyotlar, dedektörler, transistörler, fotoseller, gerilim düzenleyici gibi birçok elektronik aygıtların yapımında kullanılmaktadır (Hu, 2009).

Yarıiletkenler saf ve bileşik olmak iki grupta sınıflandırılabilir. Periyodik tablonun IV. grubunda yer alan Silisyum ,Germanyum gibi elementler saf yarıiletkendir. Bileşik yarıiletkenler periyodik tablonun III-IV, II-VI, IV-VI gruplarındaki elementlerin bir araya gelmesiyle oluşur. Bileşik yarıiletkenlere örnek olarak galyum arsenit (GaAs), çinko oksit (ZnO), kurşun sülfür (PbS) gibi örnekler verilebilir(S. Li, 2006; Principles, 2006).

Yarıiletkenler, öz direnci 10^{-2} - 10^9 ohm.cm olan ve 0 K'de yalıtkan gibi davranan malzemelerdir (Kittel,2014). 0K'de yalıtkan gibi davranmalarının sebebi ise valans bantlarının tam dolu olup iletim bantlarının boş olmasıdır. Elektrik, sıcaklık, basınç, ışık gibi dışarıdan bir etki ile valans bandındaki elektronlar serbest hale geçerek iletim bandına çıkar malzeme yarıiletken davranış sergiler. Şekil 2.1'de yalıtkan, yarıiletken ve iletkene ait enerji bant diyagramı verilmiştir (Piprek Joachim, 2003; Singh, 2003).



Şekil 2.1. Yarıiletkenlerde enerji bant diyagramları

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere yalıtkanlarda 0K’de valans bandının tamamı dolu iken iletim bandının tamamı boştur ve yasak enerji aralığı iletkenlerinkine göre daha geniştir. Bu sebepten ötürü elektronların iletim bandına geçiş yapabilmesi için büyük bir enerjiye ihtiyaç vardır. Bu da elektriğin iletilememesine neden olur (Aydoğan , 2014; Aydoğan 2016; Wilson ve Hawkes, 2000).

Yarıiletkenlere bakıldığında valans bandının tamamının dolu iletkenlik bandının kısmen boş olduğunu ve yasak enerji aralığının yalıtkanlara göre daha küçük olduğunu görülmektedir. 0K de tamamın boş olup yalıtkan gibi davranmasıdır. Yasak enerji aralığı yalıtkanlara göre daha küçük olduğundan dışarıdan bir etki ile uyarılabilirler. Artan sıcaklık ya da uygulanan elektrik alanla birlikte uyarılan elektronlar serbest hale geçer ve valans bandından iletim bandına geçiş yaparlar. İletkenlik bandı içerisine uyarılmış olan bu elektronlar akım akışına yani iletkenliğe katkı sağlar (Hummel, 1985).

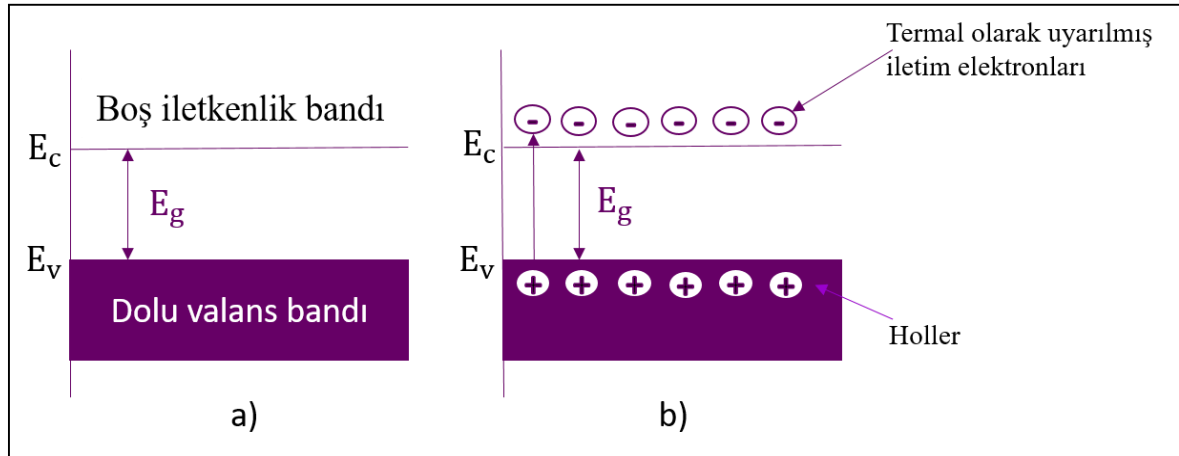
İletkenlerde ise valans bandı ve iletim bandı iç içe geçmiş durumdadır ve yasak enerji aralığı yoktur. Bu sebepten dolayı küçük bir enerji ile elektronlar iletim bandında serbest olarak hareket edebilir (Hummel, 1985).

2.1.1. Saf yarıiletkenler

Safsızlık veya örgü kusuru içermeyen yarıiletkenlere saf yarıiletkenler denir (Aydoğan , 2014; Aydoğan , 2016). Saf yarıiletkenler periyodik tabloda 4A grubunda yer alır. Son yörüngesinde 4 tane değerlik elektronu vardır. Yarıiletkenler 0 K de yalıtkan gibi davranır.

Çünkü valans bandı tamamen dolu iletkenlik bandı ise tamamen boştur, kısmen dolu bantlar yoktur. 0K de yük taşıyıcısı yoktur. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere 0 K de yüksek sıcaklıklarda ısı enerjisi alan elektronlar yasak enerji aralığını geçebilecek kadar enerji kazanıp iletim bandına geçebilirler. Valans bandında elektronların bu hareketliliğinden dolayı boşluklar oluşur. Bu boşluklar hol olarak adlandırılır ve elektriksel olarak pozitif yüklüdür. Sıcaklık artıkça elektron hol çiftleri oluşur. Yarıiletkenlerde iletkenliği katkı sağlayan yük taşıyıcıları hareketli elektronlar ve hollerdir (Aydoğan , 2014; Aydoğan 2016; Wilson ve Hawkes, 2000).

Taşıyıcılar çift olarak üretildikleri için iletim bandındaki elektronların yoğunluğu valans bandındaki hollerin yoğunluğuna eşittir. Şekil 2.2’de katkısız yarıiletkenlerde 0 K ve 0 K den büyük sıcaklıklarda enerji ve bant yapısı gösterilmiştir. Burada E_c : iletim bandının minimum enerji seviyesi, E_v : valans bandının maksimum enerji seviyesi, E_g : yasak enerji aralığını göstermektedir (J.F.B, 2000; Singh, 2003).



Şekil 2.2. Saf yarı iletkenlerde (a) T=0K ve (b) T>0K sıcaklarda bant yapısı

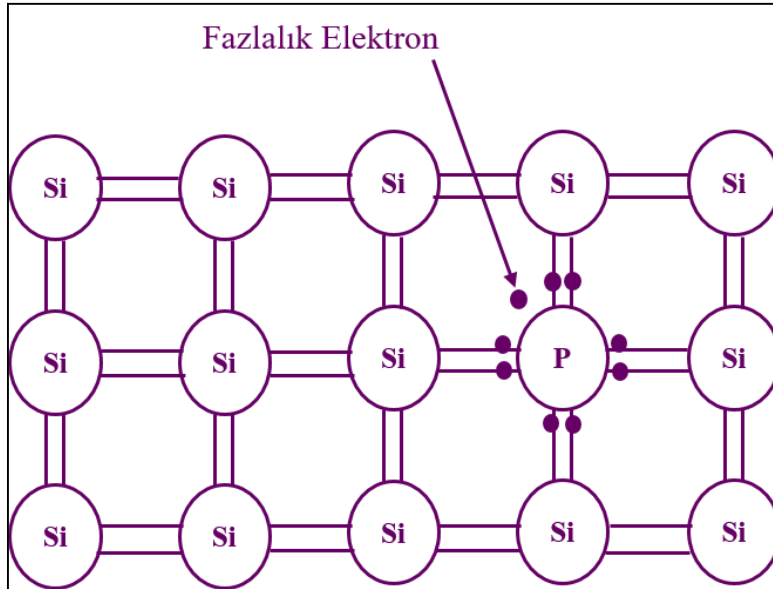
2.1.2. Katkılı yarıiletkenler

Yarıiletkenlerin yük taşıyıcılarının sayısı katkılama yapılarak değiştirilebilir. Bu durum yarıiletkenlerin kristal yapısında safsızlıklara, yarıiletkenin elektriksel özelliklerinde değişmelere neden olur. Uygun safsızlıklar oluşturularak çoğunluk yük taşıyıcılarının elektronlar olduğu veya holler olduğu kristal yapılar elde edilebilir (Aydoğan, 2014; Kittel, 2014).

Yarıiletken teknolojisinde çok tercih edilen silisyum %99,999 saflıktadır. Silisyum periyodik tabloda kendine yakın olan III. grup veya V. grup elementleriyle katkılanabilir. Katkılanan atomlar elektron verici (donör) ve elektron alıcı (akseptör) olarak görev yaparlar. Katkılamanın sonucunda p-tipi veya n-tipi özellik gösterirler (Aydoğan , 2014; Kittel , 2014).

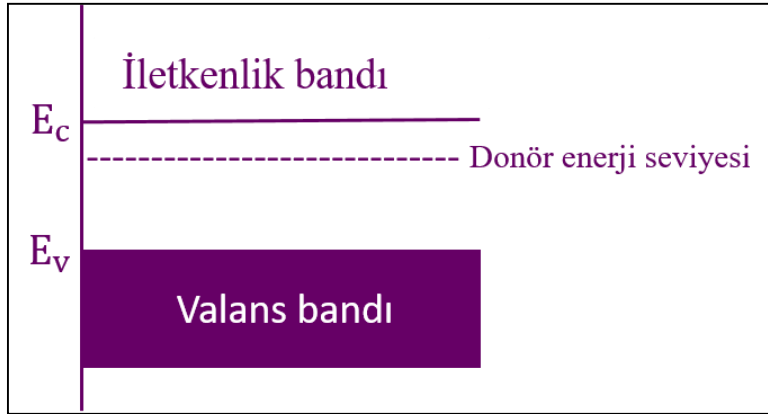
n-tipi yarıiletkenler

Dört değerlik elektronuna sahip saf yarıiletken silisyum kristali periyodik tablodaki V. grup elementlerinden biri ile katkılandığında bağ yapamayan atoma zayıf kuvvetle bağlı olan 1 elektron serbest duruma geçer. Bu elektron kolaylıkla iletim bandına uyarılabilir. İletkenlik bandında elektron oluşmasına rağmen valans bandında bir hol oluşmaz. Elektron veren bu katkı atomuna verici denilir. Bu elektron ilettime katkıda bulunur. İletimin elektronlar tarafından sağlandığı bu tip yarıiletkenlere n-tipi yarıiletken denir. Şekil 2.3’de n-tipi iki boyutta fosfor katkılı silisyum kristali gösterilmiştir (Mishra ve Singh, 2008; R.G.Lowe ; R.A. Sareen, 2017).



Şekil 2.3. n-tipi yarıiletken, P katkılı Si kristalinin iki boyutlu gösterimi

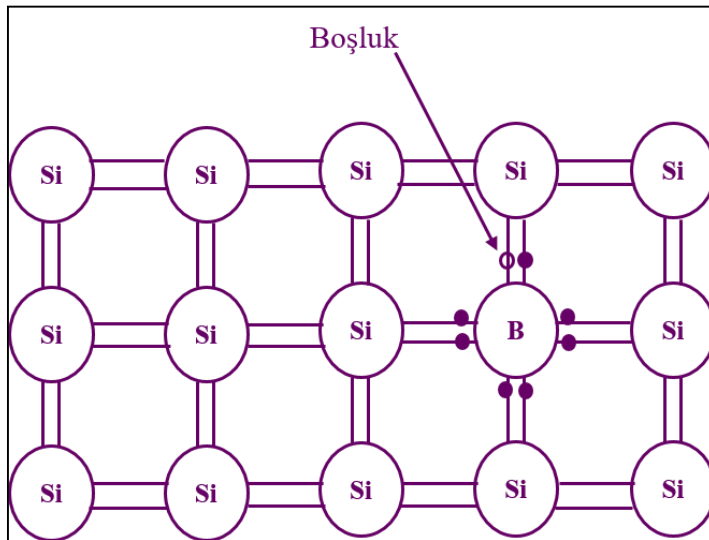
Kristal yapıya katkılama yapılması, donör enerji seviyesinin oluşmasına neden olur. Bu enerji seviyesi iletim bandının birkaç meV altında yer alan enerji seviyesidir. Şekil 2.4’de n-tipi yarıiletkenlerde enerji bant diyagramı verilmiştir (Mishra ve Singh, 2008; R.G.Lowe ; R.A. Sareen, 2017; Seeger, 2004).



Şekil 2.4. n-tipi yarıiletken enerji bant diyagramı

p-tipi yarıiletkenler

Dört değerlik elektronuna sahip saf yarıiletken periyodik tablodaki III. grup elementlerinden biri ile katkıldığında silisyumun 1 bağı boş kalır. Başka bir deyişle katkı atomları bağı tamamlamak için valans bandındaki elektronu yakalar ve valans bandında boşluk oluşur. Bu holler pozitif yüklüdür, kristal içinde hareket edebilir. İletimin holler tarafından sağlandığı bu tip yarıiletkenlere p-tipi yarıiletken denilir. Şekil 2.5’de p-tipi iki boyutta bor katkılı silisyum kristali gösterilmiştir (J.F.B, 2000; Mishra ve Singh, 2008; R.G.Lowe ; R.A. Sareen, 2017).



Şekil 2.5. p-tipi yarıiletken, B katkılı Si kristali iki boyutlu gösterimi

Kristale katkılanarak asıl atomundan elektron alan bu atomlara alıcı denilir. Kristal yapıya katkı yapılması akseptör seviyelerin oluşmasına neden olur. Bu enerji seviyeleri valans

bandının birkaç meV üstünde yer alan enerji seviyesidir. Şekil 2.6’de p-tipi yarıiletkende enerji bant diyagramı verilmiştir (Wilson ve Hawkes 2000; Mishra ve Singh, 2008).



Şekil 2.6. p-tipi yarıiletkenlerin enerji bant diyagramı

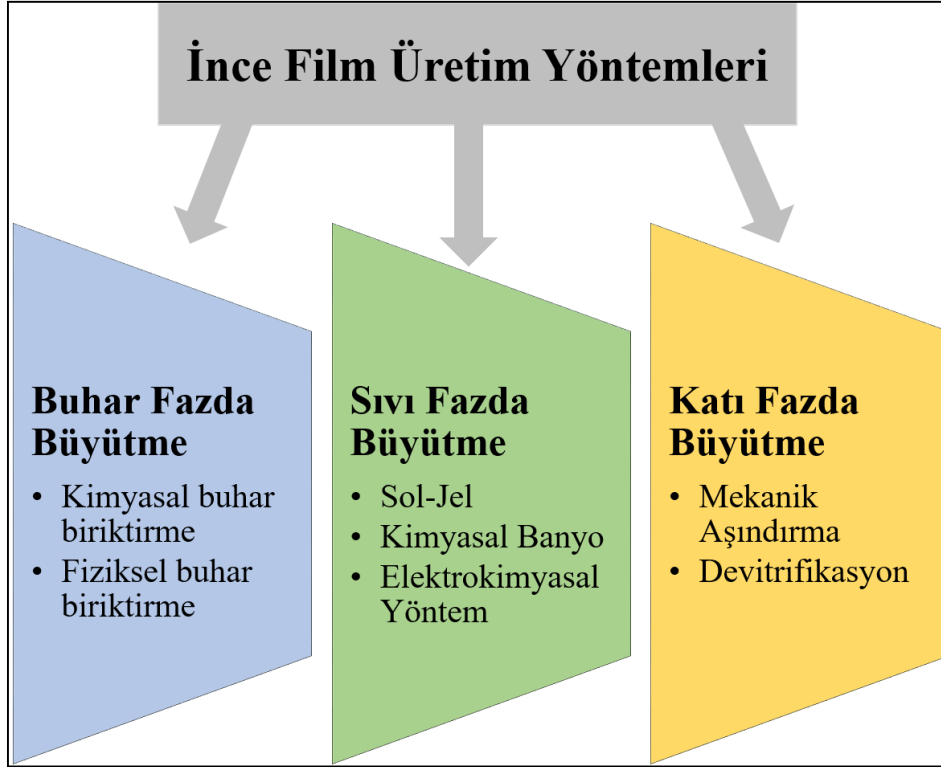
2.2. İnce Film Büyütme Teknikleri

İnce filmler, çeşitli yöntemler kullanılarak atomların tek tek bir alttaş üzerine biriktirilmesiyle elde edilen kalınlığı nm-µm arasında değişen malzemelerdir (Wasa ve diğerleri, 2016). İnce filmler yarıiletken, süperiletken malzemeler, sensörler optoelektronik uygulamalar gibi nano ve mikro boyutlarda olan çalışmalarda önemli bir yere sahiptir.

İnce filmler ilk olarak “elektroliz” yöntemi ile ilerleyen zamanlarda “kimyasal reaksiyon”, “soygaz içerisinde buharlaştırma”, “Joule ısıtması” yöntemleriyle elde edilmektedir (Zor, 1982).

İnce film biriktirme teknolojisi, elektronik ve optik endüstrilerindeki gelişmelerden ve yeni ürünlere olan ihtiyacın artmasından dolayı son 30 yılda büyük bir ilerleme göstermiştir. Elektronik cihazlardaki ilerleme yeni ince film biriktirme süreçlerinin gelişmesi ince film özellikleri ve film kalitesinin artması ile hızlanmaktadır (Henini, 2000).

İnce film üretim teknikleri buhar fazda büyütme, sıvı fazda büyütme ve katı fazda büyütme olarak üç gruba ayrılır. Şekil 2.7’de ince film üretim yöntemleri ve alt başlıkları verilmiştir. Buhar fazda büyütme iki grupta, sıvı fazda büyütme üç grupta, katı fazda büyütme iki grupta incelenmektedir.



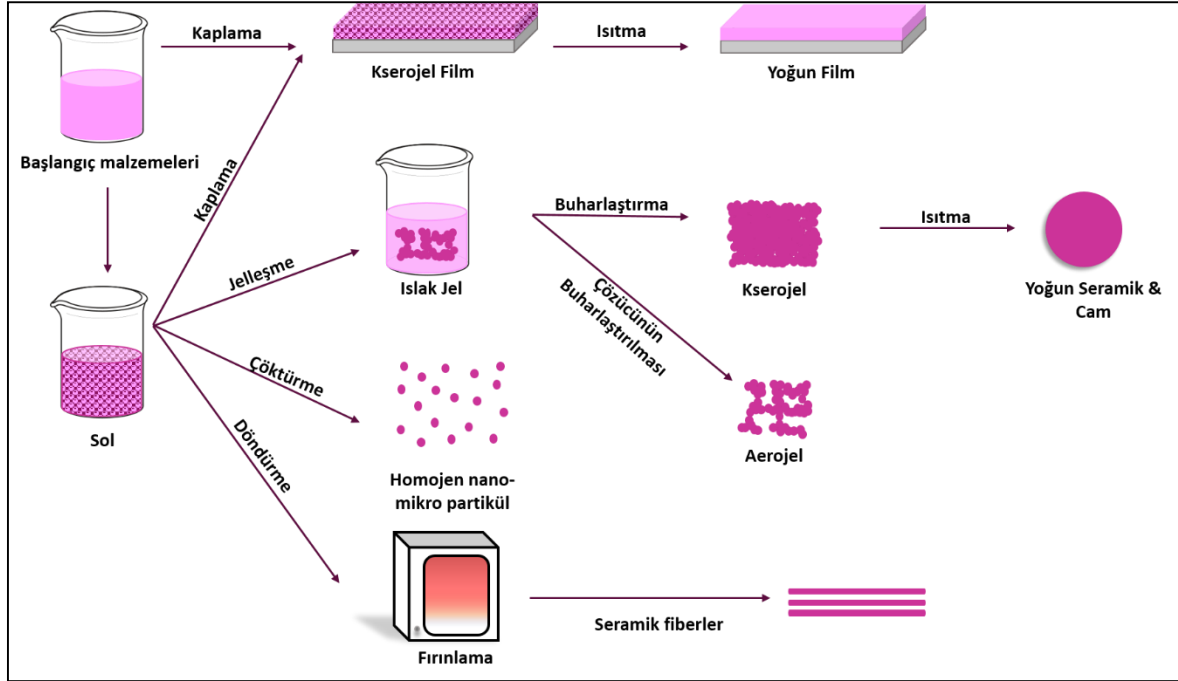
Şekil 2.7. İnce film üretim yöntemleri

2.2.1. Sol-jel üretim yöntemi

Hazırlanan en eski sollar (çözelti) 1800’lü yıllarda Faraday tarafından altınla sentezlenmiş ve ilerleyen süreçte devam eden çalışmalarla birlikte kollodial sollar, solların oluşum süreçlerini etkileyen faktörlerin üzerine araştırmalar yapılmıştır. Ebelmen ilk silika jelleri üreterek, alemina, zirkonya, arojellerin üretilmesine öncü olmuştur. Flory organik ve inorganik jellerin ağ yapısını ve oluşumuyla ilgili çalışmalar yapmıştır. Artan çalışmalarla birlikte sol-jel yöntemi teknolojik uygulamalarda yüksek saflıkta malzemeler elde edilebilen bir yöntem olmuştur (Henini, 2000; Pierre, 1998).

Sol-jel yönteminde kimyasal bileşenler bir çözücü içerisinde çözündürülerek solüsyon meydana getirilir ve kimyasal tepkimeler sonucunda koloidal yapı olan sol’a dönüşür. Sol sıvı içerisindeki koloidal katı parçacıkların süspansiyonudur. Çözelti içerisinde bulunan moleküller birbirine bağlanarak katı ağ gibi bir yapı oluşturmaya başlar böylece jel oluşur. Sol-jel sıvı fazdan katı faza geçiş ile gerçekleşen bir yöntemdir. Çözelti büyük bir oranda su içeriyorsa burada oluşan jel aquajel (hidrojel), büyük bir oranda alkol içeriyorsa oluşan jel alkojeldir. Şekil 2.8’de görüldüğü üzere buharlaştırma işlemi ile sıvı ortamdan uzaklaştırıldığında jel katı bir hal alır bu şekilde oluşan jeller kserojel ya da arojel olarak

adlandırılmaktadır (Pierre, 1998). Şekil 2.8’de sol-jel yönteminin üretim basamakları verilmektedir.



Şekil 2.8. Sol-jel yöntemi üretim basamakları (Brinker ve Scherer, 1990)

Sol-jel yönteminin düşük sıcaklıklarda uygulanabilir olması, parçacıkların boyutunun kontrolü ve koloidal parçacıkların çekirdeklenme, homojenlik süreçlerinin kontrolünün kolay gerçekleştirilmesi gibi avantajlarından dolayı tercih edilen bir yöntemdir. Sol-jel yönteminin uzun süren aşamalar içermesi ve yüksek maliyetli kimyasal kullanımı gibi dezavantajları da vardır (Altındal Yerişkin, 2017.; Hench ve West, 1990; Livage, 1997; Mackenzie, 1988; Pierre, 1998).

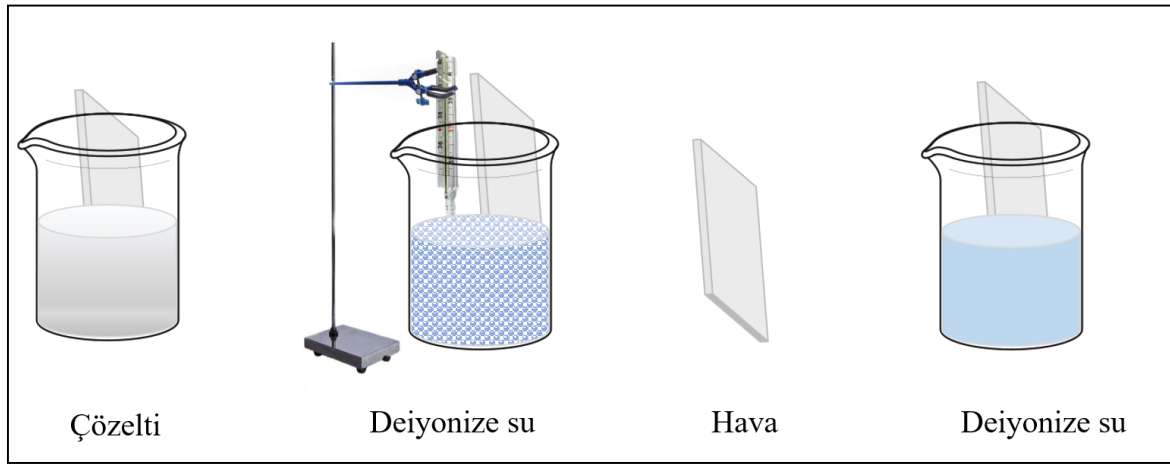
Sol-jel yöntemi yansıma önleyici kaplamalar, iletken kaplamalar, malzeme üzerinde çizilmeye, oksidasyona koruma sağlayan kaplamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sol-jel yöntemi ince film, cam, seramik, fiber, yarıiletken, nano malzeme üretimi gibi bir çok uygulama alanında kullanılmaktadır (Brinker ve Scherer, 1990; Henini, 2000; Livage, 1997; Mackenzie, 1988; Pierre, 1998).

İnce film büyütme teknikleri arasında sol-jel yöntemi ile homojen bir çözelti hazırlanarak jel yapı döndürme, daldırma gibi büyütme yöntemleri ile alttaş üzerine büyütme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Ardışık İyonik Tabaka Absorpsiyonu ve Reaksiyonu (SILAR)

kullanılan metotlardan biridir (Çorlu, 2017). Bu çalışmada düşük maliyet ve pratik olmasından dolayı SILAR tekniği kullanılmıştır.

2.2.2. Ardışık iyonik tabaka absorpsiyonu ve reaksiyonu

SILAR, alttaş ile çözelti arasında bir dizi ardışık reaksiyonları içeren sulu çözeltili ince film büyütme tekniği olup alttaşlar üzerine büyütülecek yarıiletkenin sulu çözeltiler içerisinde belli bir düzende daldırılmasıdır. SILAR tekniğinde biriktirme iyonlar aracılığıyla gerçekleşmektedir (Abdulrahman ve diğerleri 2021). Şekil 2.9’da SILAR döngüsünün şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.9. SILAR döngüsü şematik gösterimi

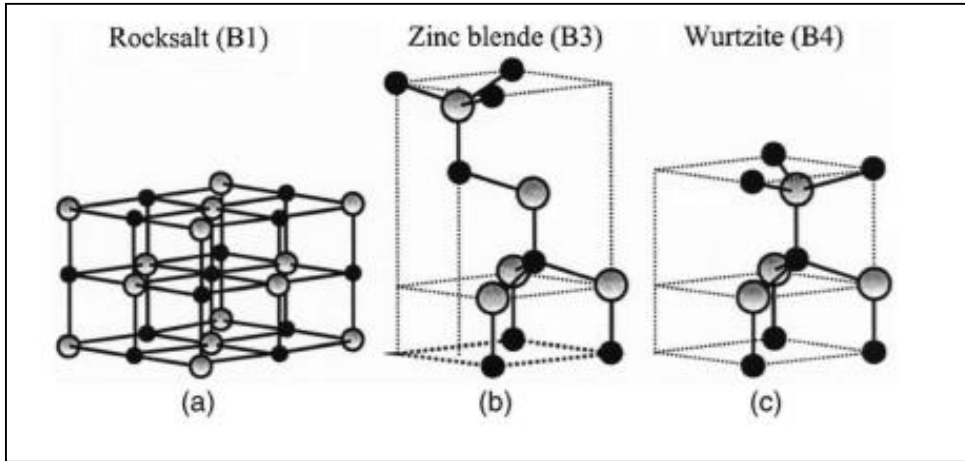
Bu tekniğin en önemli özelliklerinden biri malzemenin kalınlığını kontrol altında tutabilmesidir (Gao, Li ve Yu, 2004). Döngü sayısındaki artışla birlikte malzeme daha kararlı hale gelir fakat kalınlığında artış gözlemlenir. Bu durum malzemenin yüzeyinde iyonların kümeleşerek birikmesine sebep olur ve bunun sonucunda kopmalar meydana gelir. Bu da ince filmin kalitesinin düşmesine neden olur. Bu nedenle SILAR döngü sayısının çok fazla artırılması uygun değildir.

SILAR tekniği diğer yöntemlere göre kalınlık ve yüzey morfolojinin daha fazla düzenlenmesine olanak sağlar (Abdulrahman ve diğerleri, 2021). Bu tekniğin diğer avantajları; kolay prosedürü, düşük sıcaklıklarda büyük ölçekli hazırlama, düşük maliyet ve büyütülme işlemi sırasında vakum gerektirmemesidir.

2.3. Çinko oksit

Metal oksit yarıiletkenler, toksik olmayan yapısı, kolay erişilebilir olması ve düşük maliyette elde edilebilir olduklarından dolayı tercih edilen malzemelerdir (Kaur ve diğerleri 2021). Metal oksit yapılardan ZnO vürtzit (wurtzite) kristal yapısına sahip, inorganik bir yarıiletken olmakla birlikte geniş yasak enerji aralığı, oda sıcaklığında yüksek (60meV) eksiton bağlanma enerjisine sahip, yüksek geçirgenlik ve iletkenliğinden, düşük maliyetli üretiminden dolayı diğer metal oksit yapılara göre daha büyük bir ilgi görmüştür (Özgür ve diğerleri, 2005).

ZnO, periyodik tabloda çinkonun II grup, oksitin VI grup elementler arasında yer almasından dolayı II-VI bileşiği olarak adlandırılan ait n-tipi bir yarı iletkendir. Kaya tuzu (roksalt), vürtzit (wurtzite), zinc-blende kristal yapıları gözlenmektedir. Normal ortam koşullarında termodinamik olarak kararlı fazı vürtzittir ve örgü sabiti $a=3,24\text{\AA}$, $c=5,13\text{\AA}$, $c/a=1,60$ 'dır. Kaya tuzu yapısı yüksek basınç altında gözlemlenebilir. Şekil 2.10'da ZnO' in kristal yapıları gösterilmektedir (Lee ve diğerleri, 2016).



Şekil 2.10. ZnO kristal yapıları a) Kaya tuzu b) Zinc blende c) Vürtzit (Lee ve diğerleri, 2016)

ZnO yarıiletken özellikleri, bant yapısı, kolay elde edilmesi gibi özelliklerinin ortaya çıkmasından sonra, elde edilme yöntemleriyle ilgili çalışmalara başlandı. Büyütme yöntemleri metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) (Schmid, Hausbrand ve Jaegermann, 2014), hidrotermal büyütme (hydrothermal growth) (Karunakaran ve diğerleri 2012), buhar fazı büyütmesi (Yewale ve diğerleri 2022) gibi yöntemlerle ZnO çalışmak bilim insanlarına ilham kaynağı olmuştur. İlerleyen teknoloji ile birlikte ZnO yapılarının

SILAR gibi farklı katkılama yöntemleriyle de katkılanabileceği görülmüş ve ZnO birçok uygulama yerini almıştır.

ZnO 10^{-1} , 10^{-4} Ωcm öz direncine sahip, UV ışınların absorbe etme özelliği olan, yüksek enerjili radyasyon dayanımı olan kristal yapısından dolayı farklı alanlarda endüstride, elektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Endüstride boya, ilaç, kozmetik, plastikler için katkı maddesi olarak, elektronikte güneş pilleri, led, gaz sensörleri, lazer gibi aygıtlarda kullanılmaktadır (Lee ve diğerleri, 2016).

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

3.1. Analiz Yöntemleri

3.1.1. X ışını kırınım tekniği

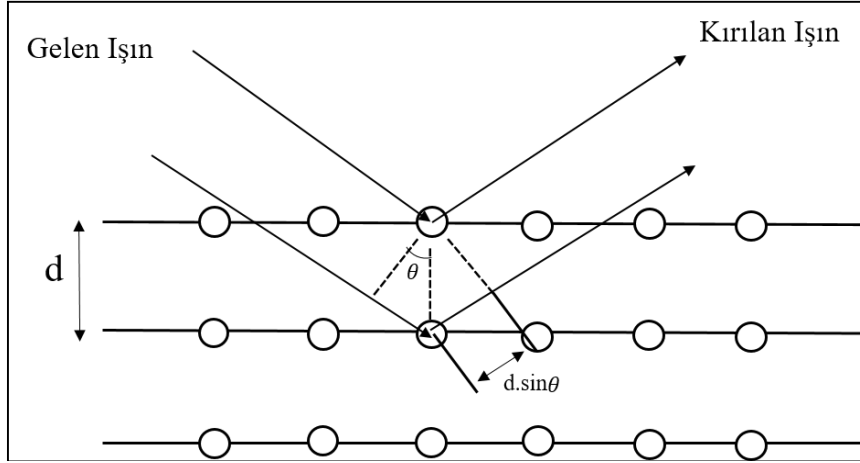
X ışınları 1895 yılında Wilhelm Conrad Röntgen tarafından keşfedilmiş. O zamanlar tam olarak doğası bilinmediği için x-ışını olarak adlandırılmıştır. 1912 yılında x ışınlarının kristal üzerinden kırınımı keşfedilmiş böylelikle dalga özelliği gösterdiği anlaşılmıştır. XRD, cisimlerin kristal yapısını araştırmak, malzemelerin örgü sabitleri, kalınlık ve kalite analizi hakkında bilgiler elde etmek için kullanılmaktadır. XRD analizi yapılacak malzemenin küçük bir parçası dahi olsa analiz için yeterlidir ve analizi yapılan malzemede bozulmalar olmaz. Her malzeme karakteristik özellikleriyle ilgili bir desen oluşturduğundan dolayı her malzemedan elde edilen kırınım deseni farklıdır (Aydoğan , 2014 ; Aydoğan 2016).

Katıların kristal yapıları, üç boyutlu uzayda katıyı oluşturan atom, atom gruplarının belirli bir geometrik bir düzende sıralanması ile oluşur. Kristal yapıları, kristal yapıların birim hücrelerinin şekli, boyutları gibi özellikleri hakkında bilgiler edinebilmek için x ışınları kırınımından faydalanılır (Bowen ve Tanner, 2006).

Kristallerde kırınım Bragg yasası ile açıklanabilir. Şekil 3.1’de x ışınları kırınımı verilmiştir. Şekil 3.1’de görüldüğü üzere x ışınları kristal yapı üzerine düşürüldüğünde paralel düzlemlerde yansımalar yapmaktadır. Gelen ışın ve yansıyan ışın arasındaki yol farkı

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.1)$$

3.1 eşitliği ile ifade edilir. Eşitlik 3.1’de λ X ışınlarının dalga boyu, d düzlemler arası mesafe olmak üzere, alınan yol, dalga boyunun tam katları olduğunda ışınlar aynı fazda olur ve esnek saçılan ışınlar bir kırınım deseni oluşturur. Esnek saçılmadan dolayı enerjide bir değişiklik olmaz (Massalski, Klug, Palmer ve Stock, 2004).



Şekil 3.1 X ışını kırınımı

X ışınları kırınımıyla, üretilen malzeme ve alttaşıla ilgili özellikler hakkında bilgi edinilmektedir. Bu tez çalışmasında X ışını kırınımı 0,02 adımda, 10°- 90°'de 2θ ölçüm aralığında Cu-Kα radyasyon kaynağı ile ($\lambda = 1,5405 \text{ Å}$) Rigaku MiniFlex II marka XRD analiz cihazı kullanılarak numunenin kristal yapısı incelenmiştir. Resim 3.1'de Rigaku MiniFlex II marka XRD analiz cihazı gösterilmiştir.



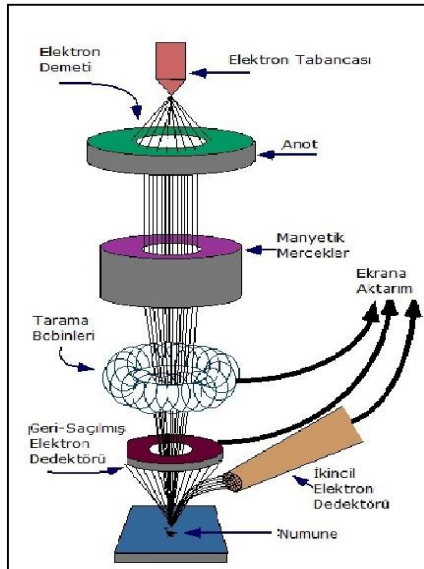
Resim 3.1 Rigaku MiniFlex II marka XRD analiz cihazı

3.1.2. Taramalı elektron mikroskobu

Taramalı elektron mikroskobu, odaklanmış elektron demetiyle malzemelerin yüzeyini tarayarak malzemenin yüzeyinden görüntü elde etmeyi sağlayan elektron mikroskoplarından biridir. Nanometreden mikrometreye kadar olan aralıkta değişen büyüklükteki görüntüleri

elde etmek, malzemenin kristal yapısını, kristal yönelimleri incelemek, numune genişliği ile ilgili bilgi sahibi olmak için kullanılan yapısal analiz yöntemidir (Tobergte ve Curtis, 2013).

SEM görüntüsü alabilmek için malzeme iletken olmalıdır. İletken olmayan malzemeler altınla kaplanarak incelenmeye hazır hale getirilmektedir. Şekil 3.2. taramalı elektron mikroskopunu şematik yapısı verilmektedir. Malzeme yüzeyinden görüntü alabilmek için elektron tabancası içerisindeki tungsten filamanı vakum içerisinde belli bir sıcaklık değerine kadar ısıtılır. Termoionik olarak tungstenden elektronlar salınır uygulanan gerilimden dolayı elektron demeti hızlanır ve kinetik enerji kazanmış olur, manyetik lensler yardımıyla malzeme üzerine yönelir. Tarayıcı bobinler elektron demetlerinin malzeme yüzeyinin tamamına yönelmesini sağlar. Elektron demeti malzeme yüzeyi ile etkileştiğinde saçılmalar meydana gelir. Saçılan birincil elektronlar enerjilerini örgüye aktarırken ikincil elektronlar dedektör tarafından toplanarak gerilim sinyaline dönüştürülür. Bu elektronlar katot tüpü üzerinde görüntü oluşturmaktadır (aydoğan şakir, 2014, 2016; Tobergte ve Curtis, 2013).



Şekil 3.2. SEM şematik gösterimi (Aydoğan, 2016)

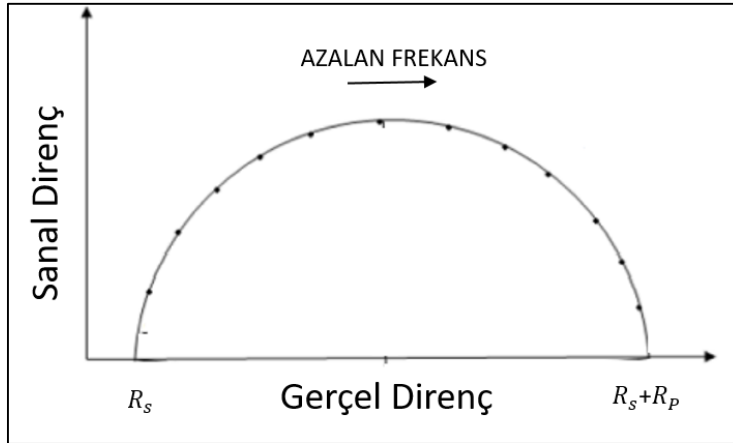
Bu tez çalışmasında ince filmlerin SEM ölçümleri Resim 3.2’de gösterilen Jeol JSM-6060LV cihazı ile yapıldı.



Resim 3.2. Taramalı elektron mikroskobu

3.1.3. Elektriksel karakterizasyon

AC gerilim altında akıma karşı malzemenin gösterdiği toplam dirence empedans denir. Empedans spektroskopisi malzemenin iletkenlik, kapasitans, yük transferleri ve gevşeme mekanizmaları ile ilgili elektriksel özelliklerini karakterize etmek için kullanılan etkili bir yöntemdir. Empedansın gerçel $Z'(\omega)$ ve sanal $Z''(\omega)$ olmak üzere iki kısımdan oluşur. Yarıiletken malzemelerin empedans özellikleri deneysel olarak ölçülen ve ya hesaplanan Z'' - Z' değerleri ile belirlenebilir, bu veriler kullanılarak eşdeğer devre modellenebilir. Bu çizim ve analiz yöntemi Nyquist eğrileri ve ya Cole-Cole olarak adlandırılır (Çorlu, 2017). Şekil 3.3'de Nyquist eğrisi verilmiştir. Düşük frekansta kapasitansın değeri sonsuz olur bu nedenle düşük frekansta kapasitörün varlığı ihmal edilir ve direnç Şekil 3.3'de verildiği gibi $R_s + R_p$ 'ye eşit olur. Frekans arttıkça kapasitörün empedans değeri artmaya başlar. Kapasitör ve R_p paralel bağlı olduğundan dolayı çok yüksek frekanslarda paralel bağlı direncin katkısı ortadan kalkar ve devrenin direnci R_s 'ye eşit olur. Şekil 3.3'de yarım çemberin gerçel empedans eksenini kestiği ilk noktada frekans en yüksek değerine ulaşır ve bu nokta seri direnci verir (Çorlu, 2017).



Resim 3.3. Nyquist grafiği

Üretilen ince filmlerin kapasitans ve iletkenlik ölçümleri Resim 3.3’ de verilen Keysight E4990A Empedans analizörü ile analiz edilmiştir. Kapasitans ve iletkenlik ölçümleri farklı bias voltajları altında geniş frekans aralığında (3kHz-1,5 MHz) gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.4. Empedans analizörü cihazı

3.2. İnce Filmlerin Üretimi

3.2.1. Altaşların hazırlanması

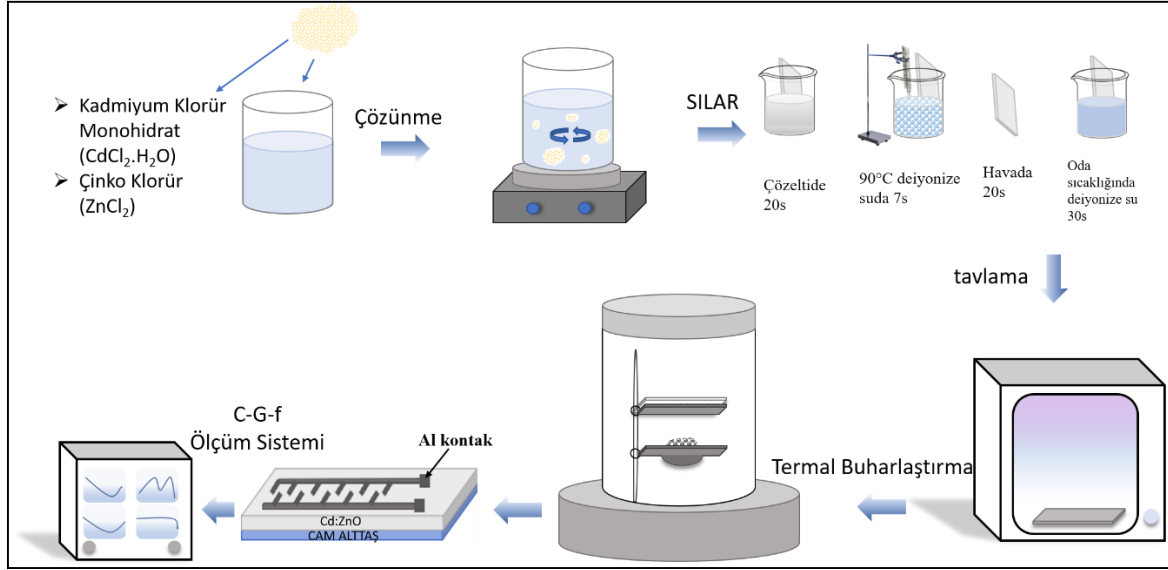
İnce film oluşturulurken büyütme yapılacak altaşların temizliği önemlidir. Çünkü herhangi bir kirlilik büyütme işlemi sırasında yüzey üzerinde safsızlıklara neden olabilir. Numunelerin altaşı olarak lamel cam kullanıldı. Camlar, 2,5cm genişlikte ve 3,5cm uzunlukta kesildi. Kesilen cam altaşlar sırasıyla 5 dakika kloroform, 5 dakika deiyonize su (18MΩ.cm öz dirençli), 5 dakika aseton, 5 dakika deiyonize su, 5 dakika etil alkol, 5 dakika

deiyonize su içerisinde ultrasonik banyoda temizlendi. Temizlenen camlar hava ortamında kurutuldu. Tek bir yüzey üzerine ince film büyütme işlemi yapabilmek amacıyla camların bir yüzeyine termal bant yapıştırıldı.

3.2.2. Kadmiyum katkılı ZnO ince filmlerin hazırlanması

Bu çalışmada Riedel-De Haën firmasından tedarik edilen %99 saflıkta kadmiyum klorür monohidrat ($\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Sigma Aldrich firmasından tedarik edilen %98 saflıkta çinko klorür (ZnCl_2) ve BDH Chemicals LTD. firmasından %25 saflıkta amonyak (NH_3) kullanıldı. Çözelti içeresine kütlece % 5 ve % 10 kadmiyum klorür monohidrat ve 0,1M çinko klorür koyuldu ve 2,5 ml deiyonize su içerisinde çözdürüldü. Çözelti manyetik karıştırıcı üzerine koyulup karıştırılmaya başladıktan 2 dakika sonra çözeltinin içeresine amonyak eklendi. Yarım saat manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Homojen, berrak sulu çözelti elde edildi.

İnce filmlerin SILAR tekniği ile büyütülme işlemi başlatıldı. İnce filmlerin SILAR ile büyütülme işlemi Şekil 3.3'de verilmiştir. Öncelikle temizlenen cam alttaşlar çözelti içeresinde daldırılıp 20s bekletildi. Hemen ardından sıcaklığı 90°C olan deiyonize su içeresinde daldırılıp 7s bekletildi (büyütme işlemi bu basamakta gerçekleşir). Çıkarıldıktan sonra 60s oda sıcaklığında hava ortamında bekletilip daha sonra 30s oda sıcaklığında deiyonize suda bekletildi. Bu döngü 40 kez tekrarlanarak numune hava ortamında kurutulmaya bırakıldı. Şekil 3.3'de ince filmlerin üretim aşamasının şematik gösterimi verilmiştir. Örnekler saf ZnO, %5 Cd-katkılı ve %10 Cd-katkılı olarak büyütüldü. Örnekler CZ, CZ5, CZ10 olarak adlandırıldı.



Şekil 3.3. İnce filmlerin üretim aşamasının şematik gösterimi

SILAR ile büyütülme işleminden sonra alttaşların Protherm marka fırınla tavlama işlemi yapıldı. Alttaşlar 300°C’de argon gazı ile 13 dakika tavlandı. IDT (interdijital) kontak oluşturulması amacıyla CZ0, CZ5, CZ10 alttaşlarının büyütülen yüzey üzerine yüksek vakum termal buharlaştırma sistemi kullanılarak 10^{-6} Torr basınç altında %99 saflıkta alüminyum termal olarak buharlaştırıldı. Resim 3.5(a)’da termal buharlaştırma işlemi sırasında ve Resim 3.5(b)’de Termal buharlaştırma işleminden sonra numunelerin resimleri verilmiştir. Hazırlanan alttaşlar elektriksel ölçüm için hazır hale getirildi.



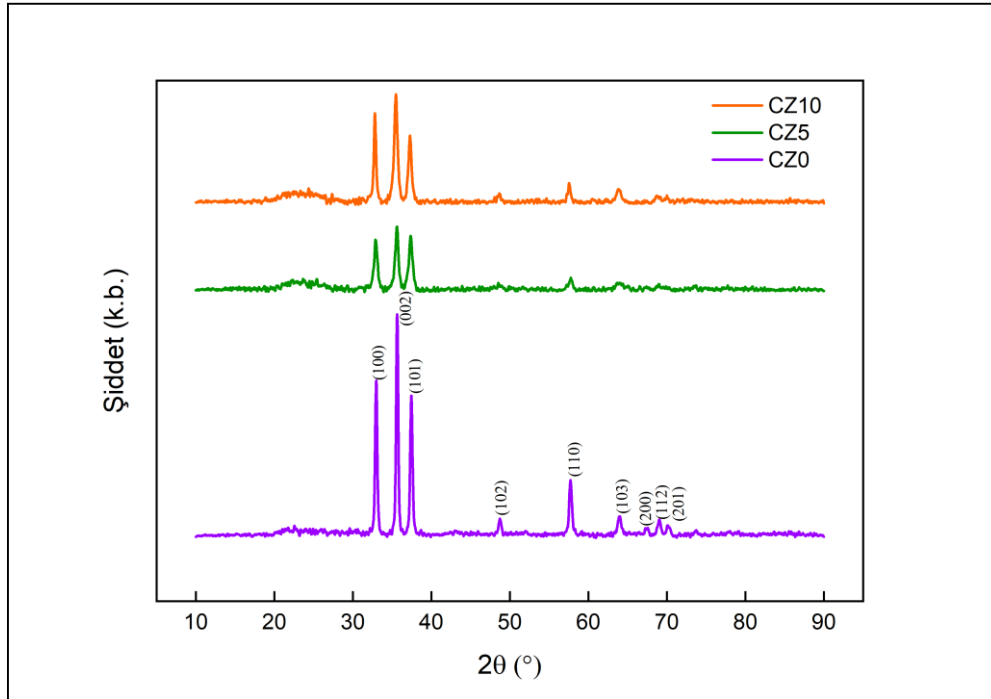
Resim 3.5. (a) Termal buharlaştırma işlemi sırasında, (b) Termal buharlaştırma işleminden sonra numunelerin resmi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

SILAR yöntemi ile üretilen CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerin XRD ve SEM analizleri sonucunda yapısal ve morfolojik özellikleri incelenmiştir. İnce filmlerin kapasite ($C-f$) ve kondüktans ($G-f$) ölçümleri 3 kHz-1,5 MHz frekans aralığında, 0-5 V arası 1 V aralıklarla alınan ölçümlerle belirlenmiştir.

4.1. CZ0, CZ5 ve CZ10 İnce Filmlerinin XRD Analizleri

SILAR yöntemi ile üretilen ince filmlerin X ışını kırınımı 0,02 adımda, 10° - 90° 'de 2θ ölçüm aralığında Cu-K α radyasyon kaynağı ile ($\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$) yapısal özellikleri belirlenmiştir. Şekil 4.1'de ince filmlerin XRD spektrumu verilmiştir. Şekil 4.1 incelendiğinde ince filmlerin XRD karakteristik pikleri incelendiğinde standart veri tabanına göre JCPDS: 00-36-1451 kartı ile uyumlu olduğu görülmüştür. (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112) ve (201) düzlemlerinde kırınım gözlemlenmiştir. Cd katkısıyla pik şiddetinin azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.1. CZ, CZ5, CZ10 ince filmlerinin XRD deseni

En şiddetli pik olan (002) piki kullanılarak ince filmlerin örgü parametreleri belirlenmiş ve kristal boyutu (D) Debye Scherrer metodu kullanılarak hesaplanmıştır.

XRD deseninin sonucunda yapının hekzagonal wurtzite fazı olduğu belirlenmiştir. Örgü parametreleri eşitlik 4.1'den faydalananarak hesaplanmış ve CZ0 numunesine ait örgü parametreleri $a=b=3,133\text{\AA}$, $c=5,031\text{\AA}$, CZ5 numunesine ait örgü parametreleri $a=b=3,139\text{\AA}$, $c=5,041\text{\AA}$, CZ10 numunesine ait örgü parametreleri $a=b=3,148\text{\AA}$, $c=5,055\text{\AA}$ olarak hesaplanmıştır.

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + l^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1 ile verilen h,k,l miller indisleridir, d düzlemler arası mesafedir. CZ0, CZ5, CZ10 ince filmlerinin XRD analizi incelendiğinde, örgü parametleri $a=b \neq c$ olduğu ve elde edilen örgü parametrelerinden en/boy oranı (c/b) $1,60\text{ \AA}$ gözlenmiştir. CZ0, CZ5, CZ10 ince filmlerin kristal boyutları eşitlik 4.2'den faydalananarak Debye-Scherer metodu (D_s) ile hesaplanmıştır.

$$D_s = \frac{K\lambda}{\beta \sin \theta} \quad (4.2)$$

Yukarıdaki denklemde, λ x ışınının dalga boyu, en şiddetli pikin β yarı pik genişliği, θ kırılma açısı, K şekil faktörü sabiti olup, değeri 0,9' dur. Hesaplamalar yapılırken en şiddetli pik olan (002) piki seçilmiş ve o pike ait değerler kullanılmıştır. CZ0, CZ5, CZ10 ince filmlerinin kristal boyutları sırasıyla 26 nm, 18,5 nm, 17,6 nm olarak hesaplanmıştır. Artan katkı ile birlikte ince filmlerin kristal boyutunda azalma olduğu gözlemlenmiştir. Örgü sabitleri, en/boy oranı, kristal boyutu, yarı pik genişliği, kırınım açısı gibi yapısal parametreler Çizelge 4.1'de verilmektedir.

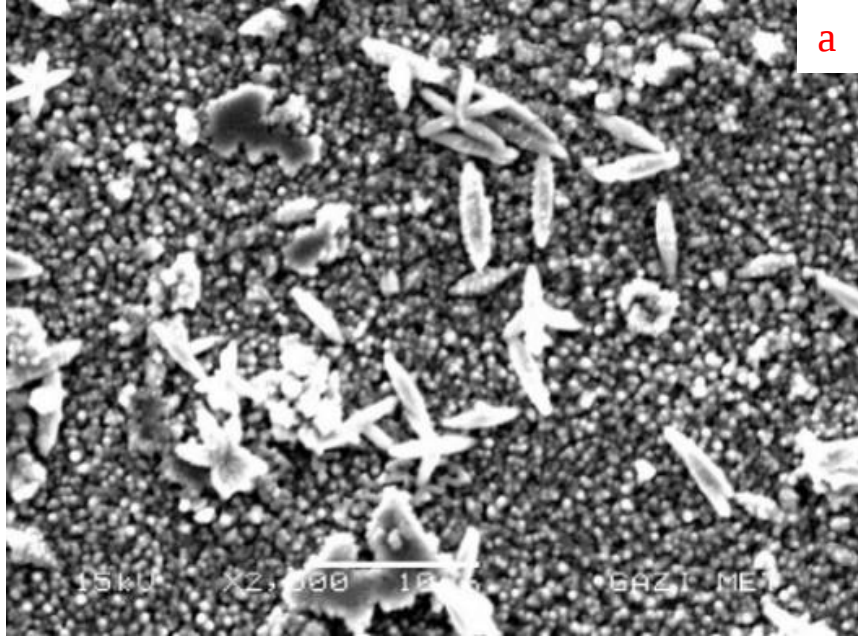
Çizelge 4.1. CZ0, CZ5, CZ10 ince filmlerinin XRD analizi

Numune Adı	Örgü Parametreleri $a=b \neq c$ (Å)		En/Boy Oranı (c/b) (Å)	Kırılma açısı θ (°)	Yarı pik genişliği β (°)	Kristal Boyutu D_s (nm)
	$a=b$	c				
CZ0	3,133	5,033	1,606	17,823	0,321	26,0
CZ5	3,139	5,041	1,605	17,808	0,452	18,5
CZ10	3,148	5,055	1,605	17,742	0,475	17,6

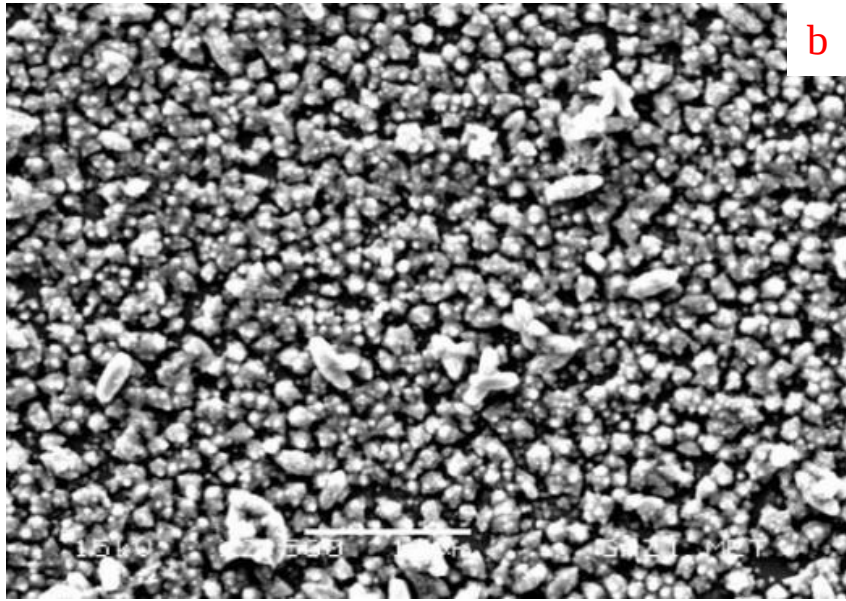
Litaratürde yapılan araştırmalar birbiriyle kıyaslandığında örneğin; Leta T. Jule ve arkadaşları sol-jel yöntemi ile üretilen Cd katkılı ZnO nanotozlarını elde ettikleri çalışmada XRD deseni incelendiğinde örgü parametresi olan $c=0,520$ nm'den $0,524$ nm'ye arttığını, Debye-Scherer medotu ile hesaplanan kristal boyutunun benzer şekilde Cd katkısı ile birlikte azaldığı gözlemlenmiştir (Jule ve diğerleri, 2016). Benzer katkı malzemesi kullanılarak yapılan başka bir çalışmada; M. Dhivya Angelin ve arkadaşları kimyasal çöktürme yöntemiyle hazırlanan Cd katkılı ZnO elektrot malzemesinin XRD desenin incelendiğinde Cd katkısı ile birlikte pik yoğunluğunun azaldığı, tepe noktalarının daha küçük açılara kaydığı gözlenmiş bu durum Zn, Cd atomlarının iyonik yarıçaplarındaki farklılığa atfedilmiştir. Benzer şekilde Debye-Scherer metodu ile hesaplanan kristal boyutunun 29.4 nm'den 24.3 nm'ye Cd katkısı ile azaldığı gözlenmiştir (Angelin ve diğerleri 2022).

4.2. CZ0, CZ5 ve CZ10 İnce Filmlerinin SEM Analizleri

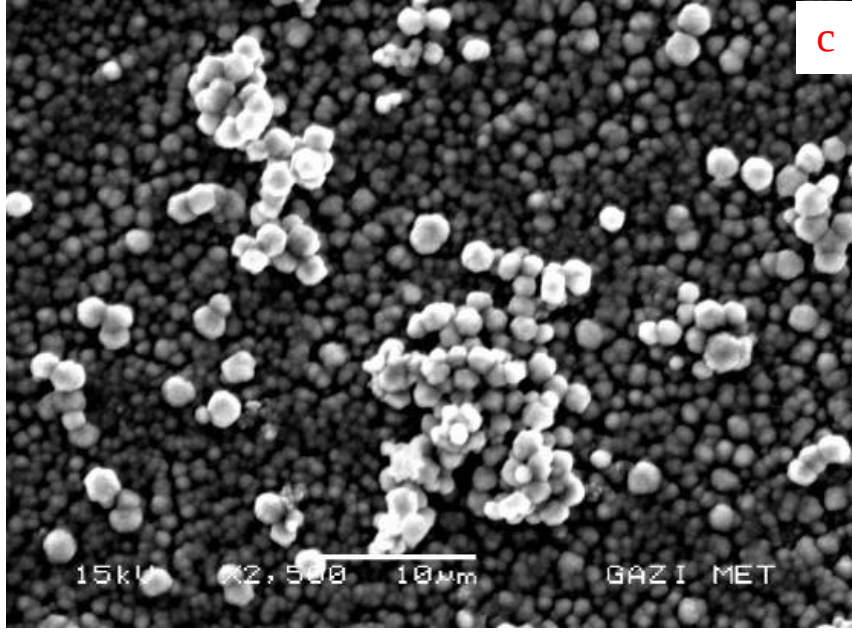
SILAR yöntemi ile üretilen CZ0, CZ5, CZ10 ince filmlerinin SEM analizi ile morfolojik analizi yapılmıştır. Resim 4.1 (a), (b), (c)' de $2,5k$ büyütme yapılarak CZ0, CZ5, CZ10 ince filmlerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Resim 4.1 (a) CZ0, (b) CZ5, (c) CZ10 ince filmler incelendiğinde düzensiz olarak dağılmış yapılar görülmektedir. Cd katkısının numunelerin morfolojisinde değişikliğe yol açtığı gözlemlenmiştir. Resim 4.1 (a)' da çubuk şeklinde yer yer yıldız yapılar gözlemlenirken, (b)' de Cd katkısı ile film yüzeyinde çubuk yapıların yerini taneli yapılara bıraktığı, (c)' de film yüzeyinde rastgele dağılmış düzensiz taneli yapıların oluştuğu ve tanelerin büyüdüğü gözlemlenmiştir.



Resim 4.1. (a) CZ0 ince filminin 2,5k büyütmedeki SEM görüntüsü



Resim 4.1. (b) CZ5 ince filminin 2,5k büyütmedeki SEM görüntüsü



Şekil 4.1. (c) CZ10 ince filminin 2,5k büyütmedeki SEM görüntüsü

Litaratürde yapılan başka çalışmalar incelendiğinde Sunita K. Kokate ve arkadaşları Cd katkılı ZnO, CdS ile ışığa duyarlı hale getirilmiş SILAR yöntemi elde edilen güneş pili çalışmasında benzer şekilde sem görüntülerinde çok sayıda taneli yapılar olduğunu, kaplanan yüzeylerin gözenekli ve pürüzlü olduğunu gözlemlemişlerdir (Kokate ve diğerleri, 2018). Benzer bir başka çalışmada C.Karunakaran ve arkadaşları Cd katkılı ZnO nanokristali hidrotermal yöntemle elde etmiş ve sem görüntülerini incelediklerinde saf ZnO numunesinde altıgen dar plaka benzeri yapılar, Cd katkısı ile birlikte tane yapısının küçüldüğünü ve morfolojiyi değiştirdiğini gözlemlemişlerdir (Karunakaran ve diğerleri, 2012). U. D. Babar ve arkadaşları geri akış yöntemi ile elde ettikleri nanoparçacıkları incelediklerinde saf ZnO numunesinin birbirine bağlı taneler şeklinde nanokristal ve polikristal morfoloji sergilediğini, %5 Cd katkılı numunenin yığın halde yapı sergilediği, %10 Cd katkılı numunenin daha büyük boyutlu yığın halde yarı küresel bir yapı sergilediği gözlenmiştir (Babar ve diğerleri, 2020).

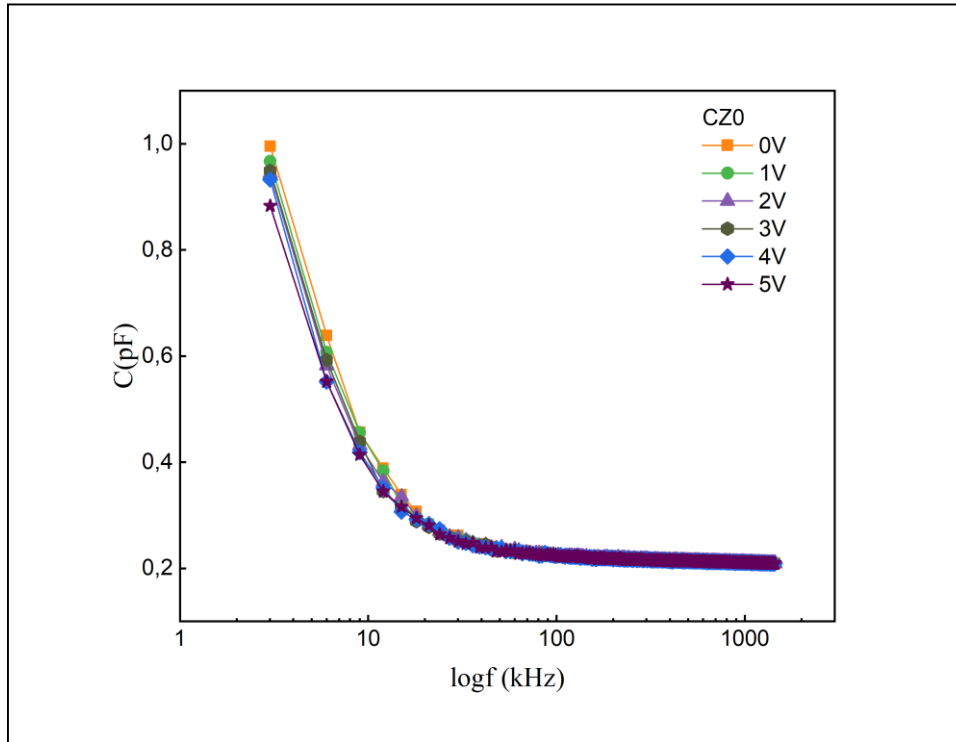
4.3. CZ0, CZ5 ve CZ10 İnce Filmlerinin Elektriksel Karakterizasyonu

SILAR yöntemi ile üretilen ince filmlerin $C-f$ ve $G-f$ ölçümleri 3kHz-1,5MHz frekans aralığında, 0-5V arası 1V aralıklarla alınan ölçümlerle belirlenmiştir. Bu ölçümlerden yola çıkarak empedans (Z), empedansın gerçel (Z') ve sanal (Z'') kısımları ve seri direnç hesaplanmış ve grafikleri çizilerek yorumlanmıştır.

4.3.1. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin farklı voltajlarda kapasitans frekans karakteristikleri

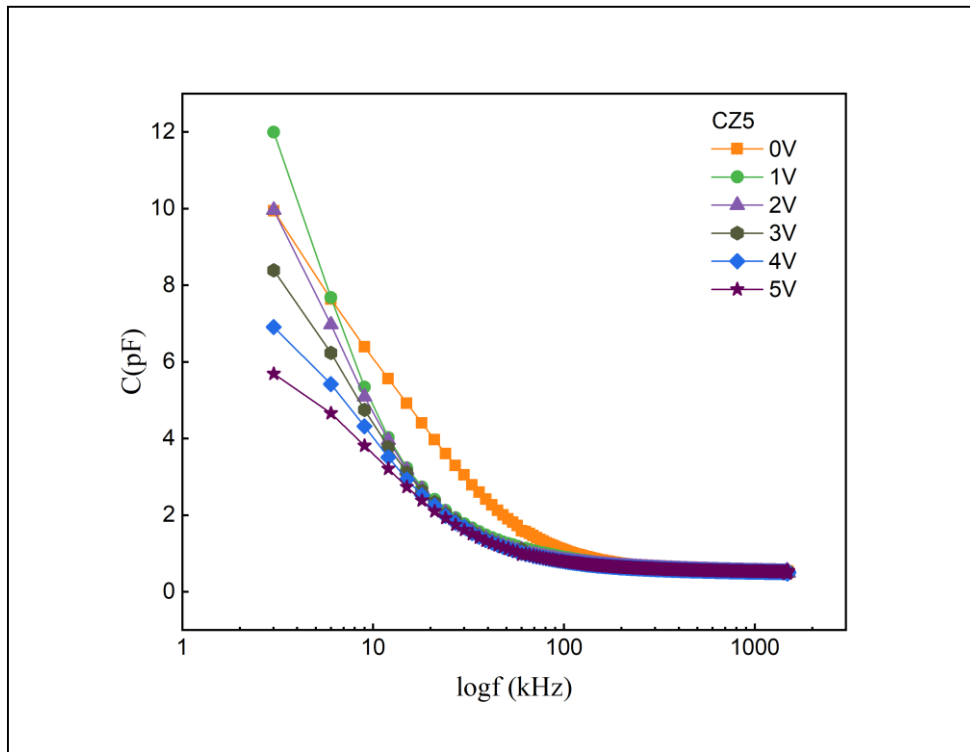
SILAR yöntemi ile üretilen CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerin farklı bias voltajlarında 3kHz-1,5MHz aralığında kapasitansın frekansa bağlı grafikleri incelenmiştir.

Şekil 4.3’de CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında kapasitans frekans grafiği verilmiştir. CZ0 ince filmi için 3 kHz frekans değerinde 0V’dan 5V’a artan bias voltajları ile birlikte kapasitansın 1 pF değerinden 0,87 pF değerine düştüğü görülmektedir. 30 kHz frekans değerine kadar artan bias voltajıyla birlikte kapasitans değerlerinde azalma gözlemlenmektedir. 30 kHz’den itibaren tüm bias voltajlarında kapasitans değerleri voltaja bağlı bir değişim göstermemektedir. CZ0 ince filminin kapasitans değerlerinin frekansa bağımlılığı üç bölgede incelenebilir. Birinci bölgede, 3 kHz’den 30 kHz’e kadar artan frekans ile birlikte kapasitans değerlerinde hızlı bir azalma gözlemlenmektedir. İkinci bölgede, 30 kHz ve 175 kHz aralığında kapasitans değerlerindeki değişimin daha yavaş azaldığı görülürken üçüncü bölgede ise, 175 kHz’den 1,5 MHz’e kadar kapasitans değerlerinde değişim çok azdır. 0V bias voltajı altında artan frekans ile birlikte kapasitans değerleri yaklaşık 1 pF değerinden 0,2 pF değerine azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.2. CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında kapasitans frekans grafiği

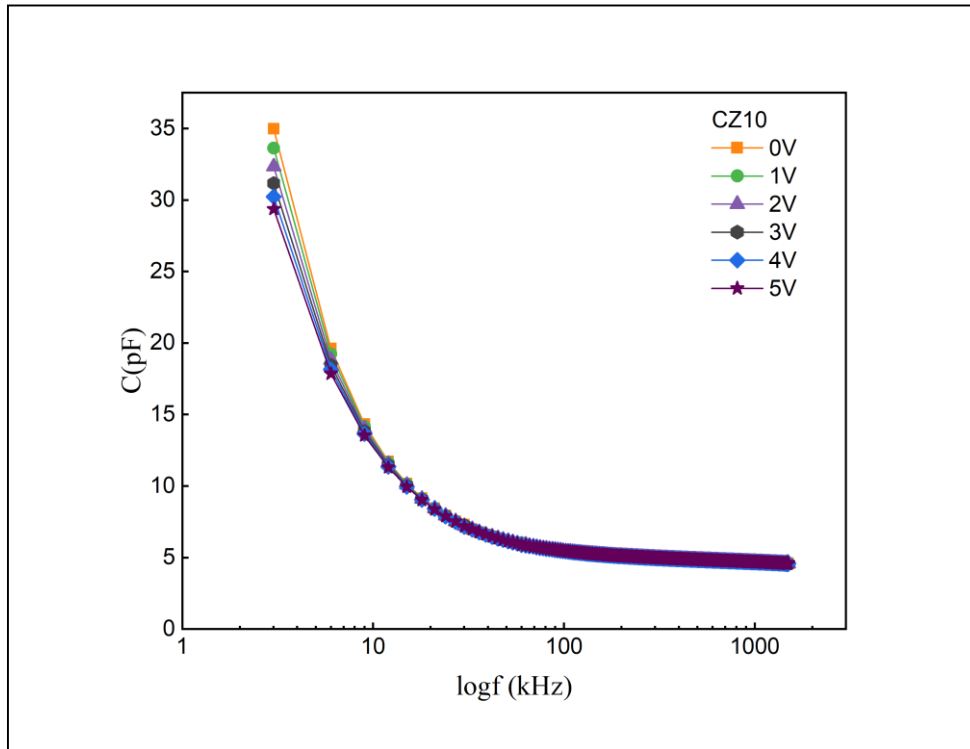
Şekil 4.4’de CZ5 ince filminin 0-5V arası değişen bias voltajlarında kapasitans frekans grafiği verilmiştir. CZ5 için 3 kHz frekans değerinde 1V değerinden itibaren artan bias voltajları ile birlikte kapasitans değeri 12 pF’den 5,7 pF’a düştüğü görülürken 0V ve 2V bias voltajı altında kapasitans değeri aynı olup 10 pF değerindedir. 230 kHz frekans değerine kadar artan bias voltajıyla birlikte kapasitans değerlerinde azalma gözlemlenmektedir. 230 kHz’den itibaren tüm bias voltajlarında kapasitans değerleri voltaja bağlı bir değişim göstermemektedir. CZ5 malzemesinin kapasitans değerlerinin frekansa bağımlılığı üç bölgede incelenebilir. Birinci bölgede, 3 kHz’den 50 kHz’e kadar artan frekans ile birlikte kapasitans değerlerinde hızlı bir azalma gözlemlenmektedir. İkinci bölgede, 50 kHz ve 385 kHz aralığında kapasitans değerlerindeki değişimin daha yavaş azaldığı görülürken üçüncü bölgede ise, 385 kHz’den 1,5 MHz’e kadar kapasitans değerlerinde değişim gözlenmemiştir. 0V bias voltajı altında artan frekans ile birlikte kapasitans değerleri yaklaşık 12 pF değerinden 0,5 pF değerine azaldığı görülmüştür.



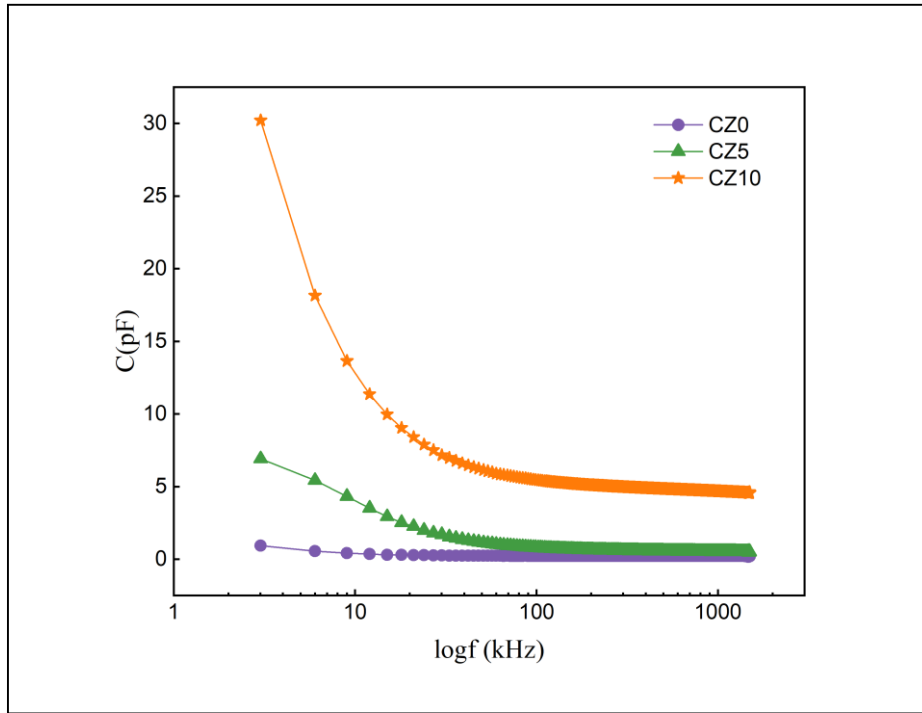
Şekil 4.3. CZ5 ince filminin farklı bias voltajlarında kapasitans frekans grafiği.

Şekil 4.5’de CZ10 ince filminin 0-5V arasında değişen bias voltajı altında kapasitans frekans grafiği verilmiştir. CZ10 ince filmi için 3 kHz frekans değerinde artan bias voltajları ile birlikte kapasitansın 35 pF değerinden 29 pF değerine düştüğü görülmektedir. 25 kHz frekans değerine kadar artan bias voltajıyla birlikte kapasitans değerlerinde azalma

gözlemlenmektedir. 25 kHz'den itibaren tüm bias voltajlarında kapasitans değerleri voltaja bağlı bir değişim göstermemektedir. CZ10 ince filminin kapasitans değerlerinin frekansa bağımlılığı iki bölgede incelenebilir. Birinci bölgede, 3 kHz'den 55 kHz'e kadar artan frekans ile birlikte kapasitans değerlerinde hızlı bir azalma göstermektedir. İkinci bölgede, 55 kHz ve 1,5 MHz aralığında kapasitans değerlerindeki değişimin daha yavaş azaldığı görülmüştür. 0V bias voltajında artan frekans ile birlikte kapasitans değerleri yaklaşık 35 pF değerinden 4,6 pF değerine azaldığı görülmüştür.



içinde çok az bir değişim olmaktadır. Bunun nedeni metal kontak ile ince film arasındaki arayüzeyde düşük frekanslarda AC sinyali takip edebilen fakat yüksek frekanslarda sinyali takip edemeyen yük taşıyıcılarından kaynaklanabilir (Turan ve diğerleri, 2021). Her üç ince film için 4V bias voltajında ölçüm sonuçları incelendiğinde artan katkı oranı ile kapasitans değeri artmaktadır. Bu durum Cd katkısının kapasitif özelliği arttırdığını göstermektedir.



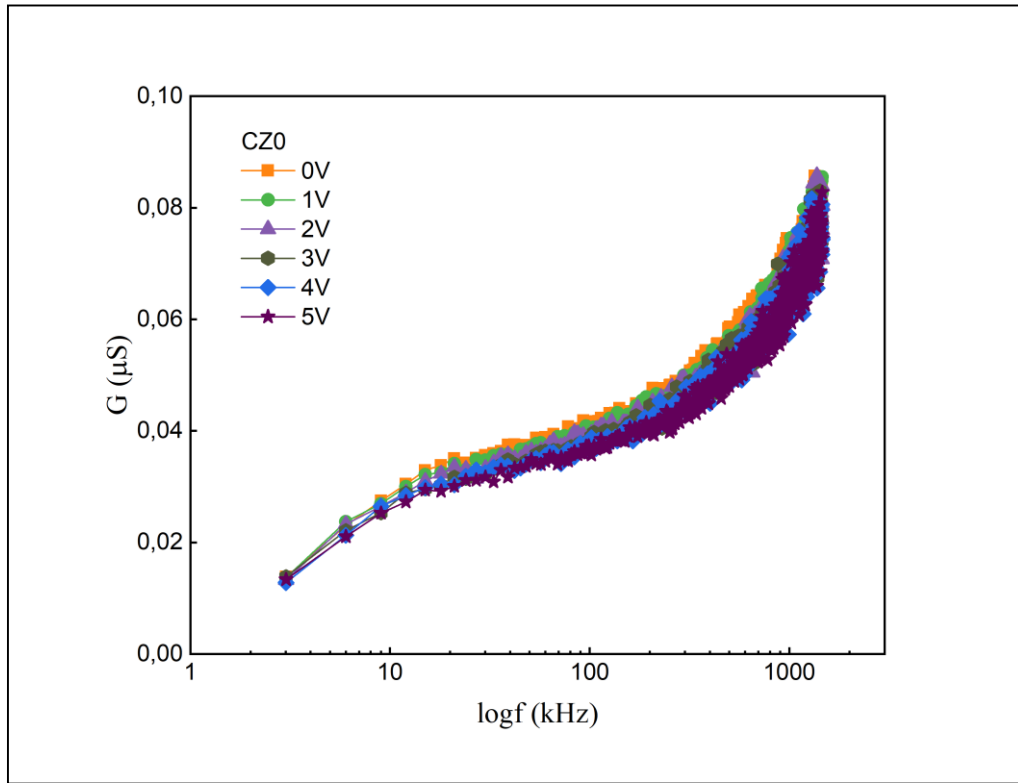
Şekil 4.5. 4V bias voltajı altında CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin kapasitans frekans grafiği

4.3.2. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin farklı voltajlarda iletkenlik frekans karakteristikleri

SILAR yöntemi ile üretilen CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerin farklı bias voltajlarında 3kHz-1,5MHz aralığında iletkenlik frekans grafikleri incelenmiştir.

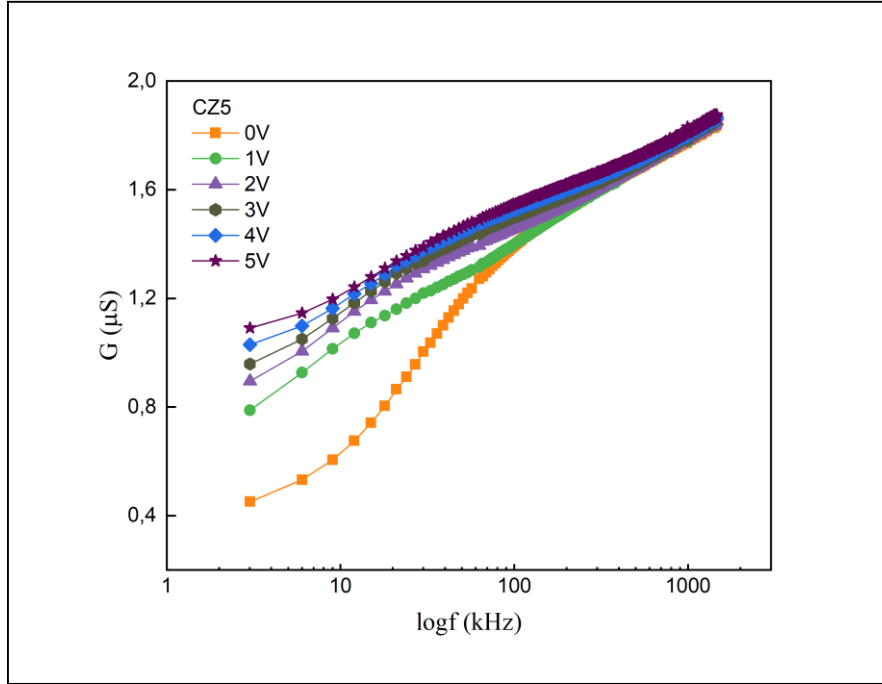
Şekil 4.7’de CZ0 ince filminin farklı bias voltajları altında iletkenlik frekans grafiği verilmiştir. CZ0 numunesi için 3 kHz değerinde iletkenlik değeri 0,01 μ S olup artan bias voltajları ile birlikte değişim göstermemektedir. 3kHz frekans değerinden itibaren artan bias voltajıyla iletkenlik değerlerinde azalma görülmektedir. 1,5 MHz frekans değerlerinde artan bias voltajları ile birlikte iletkenlik değeri 0,08 μ S’den 0,07 μ S değerine düşmektedir. CZ0

ince filmi için iletkenlik değerlerinin frekans bağımlılığı üç bölgede incelenebilir. Birinci bölge 3 kHz ile 30 kHz arasında iletkenlikte hemen hemen lineer bir artış olmaktadır. İkinci bölge 30-200 kHz frekans aralığı iletkenlikteki değişimin daha az olduğu ve üçüncü bölge 200 kHz-1,5 MHz frekans aralığı iletkenlikte belirgin bir değişim gözlenmektedir. 0V bias voltajı altında artan frekansla iletkenlik değerlerinin birinci bölgede 0,01 μS 'den 0,03 μS 'e, ikinci bölgede 0,01 μS 'den 0,04 μS 'e, üçüncü bölge 0,04 μS 'den 0,08 μS değerine arttığı görülmüştür.



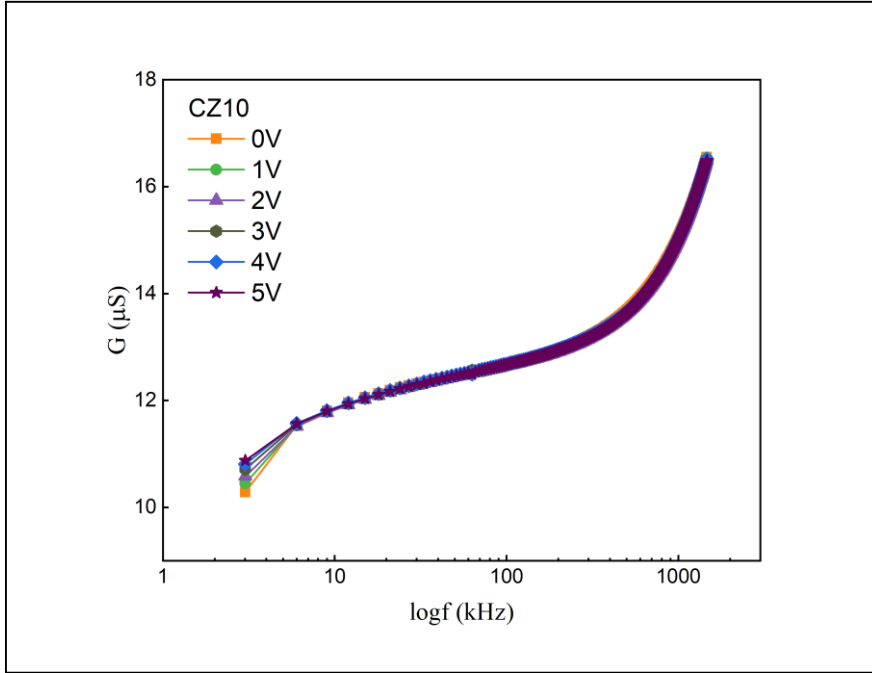
Şekil 4.6. CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında iletkenlik frekans grafiği

Şekil 4.8'de CZ5 ince filminin 0-5V arasında değişen bias voltajlarında iletkenlik frekans grafiği verilmiştir. CZ5 numunesi için 3-400 kHz frekans aralığında artan bias voltajları ile birlikte iletkenlik artmaktadır. 3 kHz frekans değerinde artan bias voltajında iletkenlik değerlerinde 0,45 μS 'den 1,1 μS değerine artış göstermektedir. 400 kHz ile 1,5 MHz frekans aralığında artan bias voltajıyla iletkenlikte belirgin bir değişim gözlenmemektedir. CZ5 numunesi için iletkenlik değerlerinin frekans bağımlılığı incelendiğinde tüm frekans değerleri için iletkenlikte 0V haricinde hemen hemen lineer bir artış olmaktadır. 0V bias altında artan frekansla iletkenlik 0,45 μS değerinden 1,85 μS değerine belirgin bir artış gözlemlenmektedir.



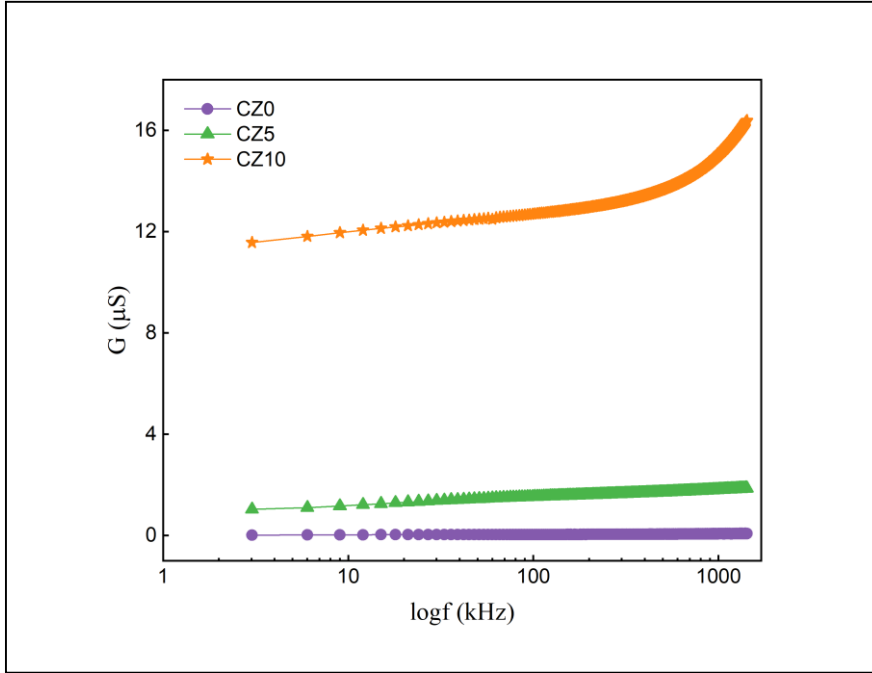
Şekil 4.7. CZ5 ince filminin farklı bias voltajlarında iletkenlik frekans grafiği

Şekil 4.9’da CZ10 ince filminin değişen bias voltajları altında iletkenlik frekans grafiği verilmiştir. CZ10 numunesi için 3kHz değerinde artan bias voltajları ile birlikte iletkenlik değerleri 10,2 μS ’den 10,8 μS değerine artış gösterirken 3kHz frekans değerinden itibaren artan frekansla 0-5V arası bias voltajlarında iletkenlik değerinde voltaja bağlı değişim gözlenmemektedir. 1,5 MHz frekans değeri için tüm bias voltajlarında iletkenlik değeri 16,5 μS ’dir. CZ10 ince filmi için iletkenlik değerlerinin frekansa bağımlılığı üç bölgede incelenebilir. Birinci bölgede (3kHz-90kHz) ve üçüncü bölgede (220kHz-1,5MHz) iletkenlikte belirgin bir değişim görülürken ikinci bölgede (90-220kHz) iletkenlikteki değişim daha azdır. 0V bias voltajında artan frekans ile birlikte iletkenlik değeri 10,2 μS değerinden 16,5 μS değerine arttığı görülmüştür.



Şekil 4.8. CZ10 ince filminin farklı bias voltajlarında iletkenlik frekans grafiği

Şekil 4.10’da CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin 4V bias voltajı altında iletkenlik frekans grafiği verilmiştir. CZ0 ve CZ5 numunelerinin iletkenlik değerindeki artış miktarı CZ10 numunesine göre daha azdır. CZ10 numunesinin 3-400 kHz frekans aralığında iletkenlik değerindeki artış yavaş artarken 400 kHz-1,5 MHz frekans aralığında iletkenlikteki artış daha hızlıdır. Bu durum iletim mekanizmasının özellikle düşük frekans ve yüksek frekans bölgelerinde iki zıt gevşeme sürecinin oluştuğuna atfedilir (Gaabel ve diğerleri, 2019). Üç ince filmde artan frekans ile iletkenliğin arttığı görülmektedir. Her üç ince film için 4V bias voltajı için ölçüm sonuçları incelendiğinde katkı oranı ile iletkenlik değeri artmaktadır. 1 MHz frekansta iletkenlik değerleri CZ0 ince filmi için 0,07 μ S, CZ5 ince filmi için 1,8 μ S, CZ10 ince filmi için ise 16,5 μ S değerini alır.



Şekil 4.9. 4V bias voltajı altında CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin iletkenlik frekans grafiği

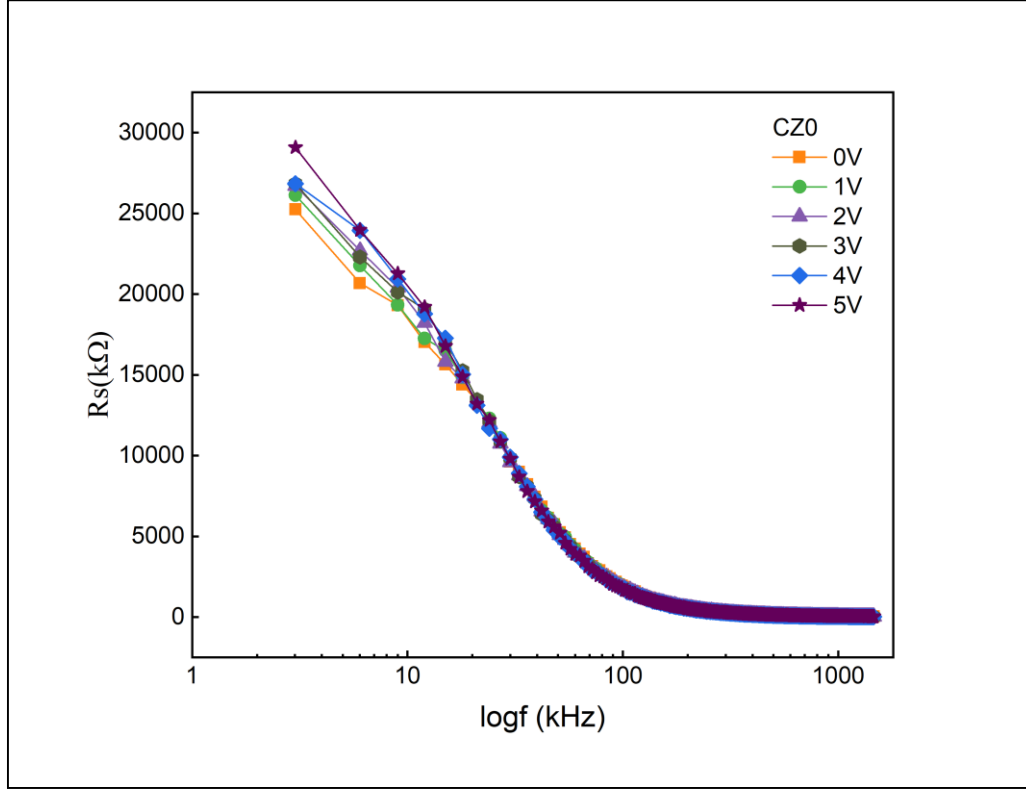
4.3.3. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin farklı voltajlarda seri direnç-frekans karakteristikleri

SILAR yöntemi ile üretilen CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerin R_s değerleri kapasitans ve iletkenlik değerleri kullanılarak Nicollian-Brews tekniği ile elde edilmiştir. Seri direnç değerleri Eşitlik 4.3 ile hesaplanmıştır (Nicollian ve Brews, 1982) .

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4.3)$$

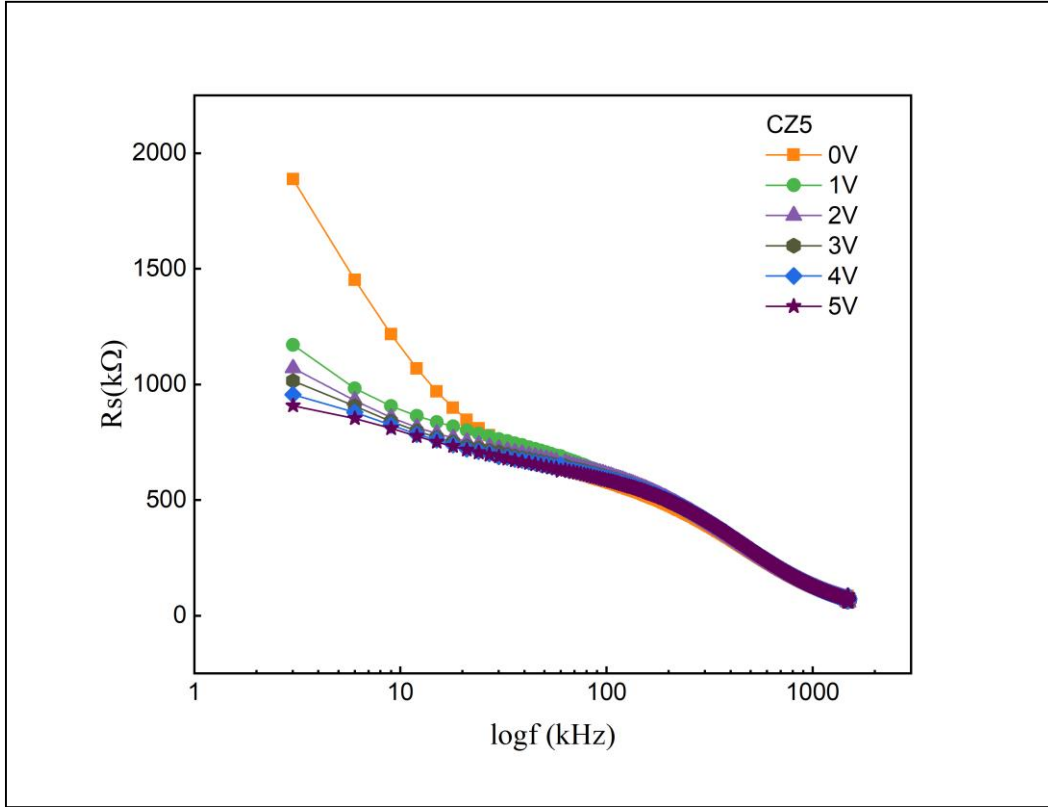
G_m :ölçülen iletkenlik C_m ;ölçülen kapasitans değerleri, $\omega=2\pi f$ olarak verilir ve açısal frekans olarak tanımlanır. Şekil 4.11’de CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında seri direnç frekans grafiği verilmiştir. 3 kHz frekans değerinde 0-5V arası artan bias voltajıyla seri direnç değerinin 25000 k Ω ’dan 29000 k Ω ’e artmaktadır. 3 kHz ile 30 kHz frekans aralığında artan bias voltajlarında seri direnç değerlerinde artış gözlenmektedir. 30 kHz’den büyük frekans değerlerinde bias voltajındaki değişim ile seri dirençte değişim olmamaktadır. CZ0 numunesinin frekans bağımlılığı incelendiğinde 3 kHz’den 100 kHz’e kadar artan frekansla seri direnç değerinde hızlı bir azalma söz konusuyken 100 kHz’den 1,5 MHz’e kadar artan

frekansla seri direnç değeri daha yavaş bir azalma gözlenmektedir. 0V bias voltajı altında artan frekansla birlikte seri direnç değeri 25000 k Ω 'dan 21 k Ω değerine azalmıştır.



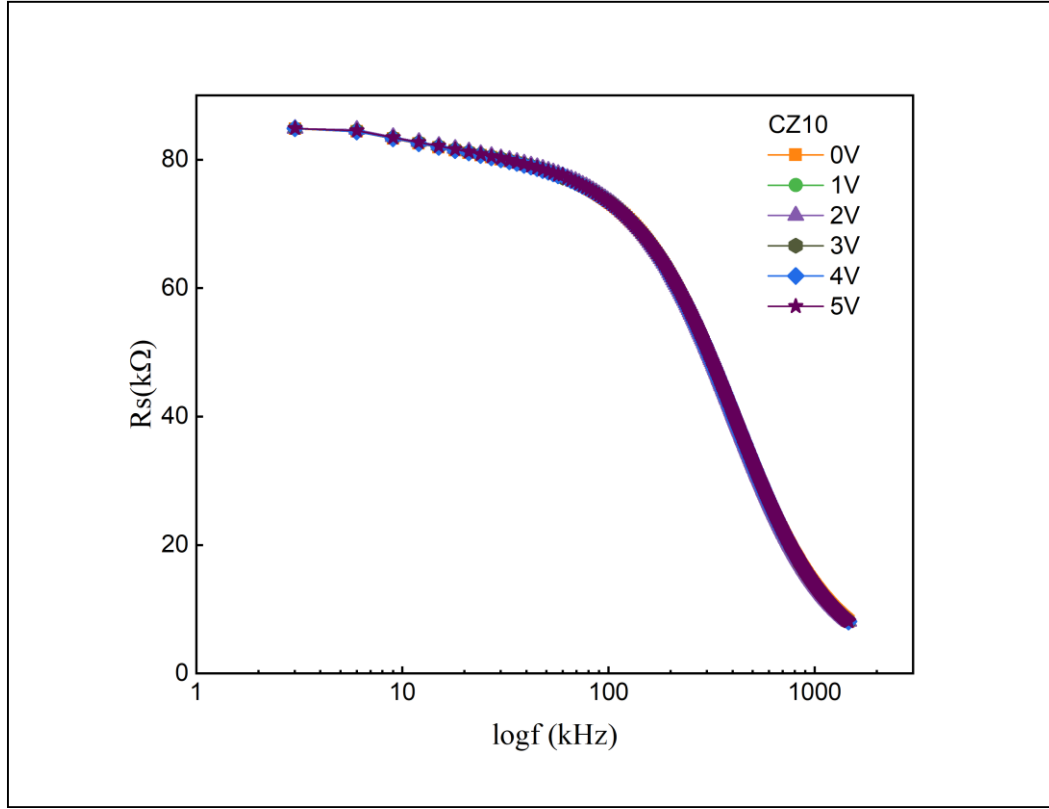
Şekil 4.10. CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında seri direnç frekans grafiği

Şekil 4.12'de CZ5 ince filminin farklı bias voltajlarında seri direnç frekans grafiği verilmiştir. CZ5 numunesi için 3kHz değerinde frekans değerinde 0V'dan 5V'a kadar artan bias voltajı ile birlikte seri direncin değeri 1900 k Ω 'dan 910 k Ω 'a azalmıştır. 3-30 kHz aralığında 0V bias voltajında diğer bias voltajlarına göre seri direnç değerinde daha belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. 3 kHz'den 200 kHz olan frekans değerine kadar artan bias voltajı ile birlikte seri dirençte azalma söz konusuysun 200 kHz'den itibaren seri dirençte bias voltajına bağlı bir değişim olmamaktadır. CZ5 numunesinin seri direnç değerlerinin frekans bağımlılığı üç bölgede incelenebilir. 3-20 kHz frekans aralığında olan bölgede hızlı bir azalma olurken 20-200 kHz aralığında ki bölgede azalma miktarı daha azdır. 200kHz'den 1,5MHz'e kadar olan bölgede diğer iki bölgeye göre seri direnç değerindeki azalma miktarı daha fazladır. 0V bias voltajı altında artan frekansla seri direnç 1900 k Ω 'dan 56 k Ω 'a kadar azalmaktadır.



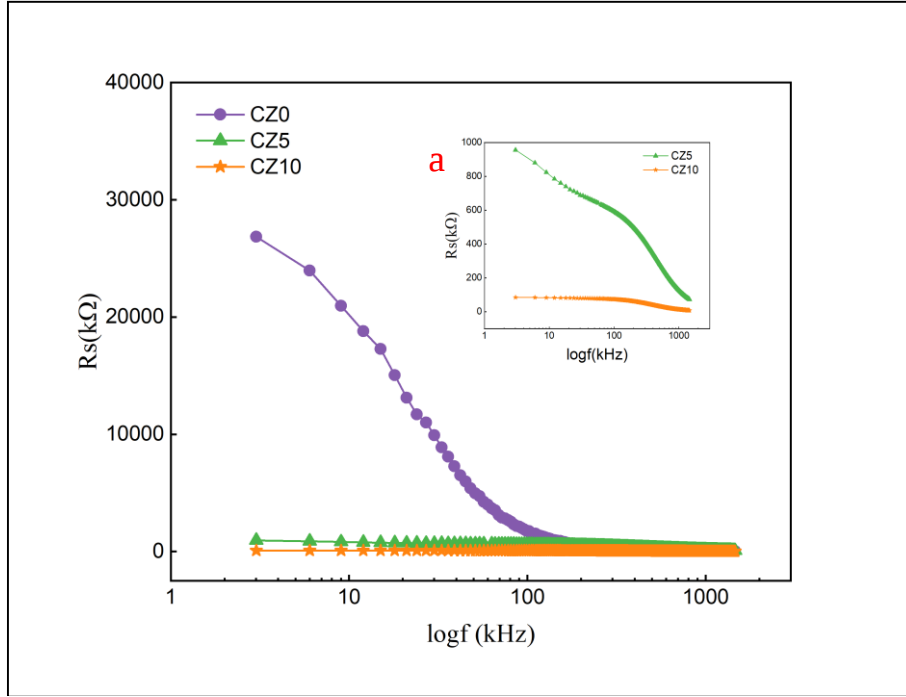
Şekil 4.11. CZ5 ince filminin farklı bias voltajlarında seri direnç-frekans grafiği

Şekil 4.13’de CZ10 ince filminin farklı bias voltajları altında seri direnç frekans grafiği verilmiştir. CZ10 ince filmi için 3 kHz frekans değerinde seri direnç 85 kΩ olup artan bias voltajıyla değişim gözlenmemektedir. Ölçülen bütün frekanslar değerleri için seri direnç voltaja bağımlı değildir. CZ10 numunesinin frekans bağımlılığı incelendiğinde 3-100 kHz frekans aralığında seri direnç değerinde azalma miktarı düşük iken 100 kHz-1,5 MHz frekans aralığında seri direnç değerinde belirgin bir azalma görülmektedir. 0V bias voltajında artan frekansla seri direnç değerinde 85 kΩ’dan 8 kΩ’a azalmaktadır.



Şekil 4.12. CZ10 ince filminin farklı bias voltajlarında seri direnç frekans grafiği

Şekil 4.14' de CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin 4V'taki seri direnç frekans grafiği, verilmiştir. Şekil 4.14 (a)'da CZ0 numunesinde 3 kHz ile 200 kHz frekans aralığının da 29000 kΩ'dan 21 kΩ'a seri direnç değerinin düştüğü belirgin bir azalma olurken CZ5, CZ10 numunelerinin seri direnç değerinde CZ0'a göre belirgin bir değişim gözlenmemektedir. CZ0 numunesinin 200 kHz frekans değerinden itibaren seri direnç değerinde belirgin değişim gözlenmemektedir. Şekil 4.14'da CZ0 numunesinin seri direnç değeri diğer numunelere göre daha büyük olduğu için hepsinin aynı grafik içindeki davranışları net bir şekilde gözlemlenemediğinden dolayı Şekil 4.14(a)'da CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin 4V'taki seri direnç frekans grafiği verilmiştir. Şekil 4.14(a) incelendiğinde CZ5 numunesinin seri direnç değeri 950 kΩ'dan 75 kΩ'a CZ10 ince filminde ise 85 kΩ'dan 8 kΩ'a azalmaktadır. Başka bir deyişle CZ5 ince filminin CZ10 numunesine göre artan frekansla seri direnç değerinde daha belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Her üç ince film için 4V'daki ölçüm sonuçları incelendiğinde artan katkı oranı ile seri direnç değerleri azalmaktadır. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin seri direnç değerleri incelendiğinde düşük frekans bölgelerinde seri direnç değerinin yüksek frekans bölgelerinden daha fazla olması polarizasyon ve arayüzey durumlarının düşük frekans bölgelerinde daha etkili olması ile açıklanabilir (Erbilen Tanrıku ve diğerleri 2018).



Şekil 4.13. 4V bias voltajında CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin seri direnç frekans grafiği
(a) 4V bias voltajında CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin seri direnç frekans grafiği

4.3.4. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin farklı voltajlarda empedans frekans karakteristikleri

Empedans spektroskopisi elektriksel özellikleri analiz etmek amacıyla dielektrik gevşemelerin ve iletim mekanizmalarının incelenmesi için kullanılan yöntemdir. Empedans, bir devre içerisinde AC akıma karşı malzemenin gösterdiği toplam direnç olarak tanımlanmaktadır. AC akımı bir empedans üzerinden geçtiği zaman, reaktans ile gerilim arasında -90° ile 90° aralığında bir faz farkı oluşturur. Faz farkı 0° olduğunda empedans dirence eşittir fakat faz farkı 90° ($+90^\circ$ veya -90°) olduğunda ise empedans indüktif reaktans ($+90^\circ$) veya kapasitif reaktans (-90°) özelliğe sahip olur (Serway ve Beichner, 2011). Empedansın sanal ve gerçek olmak üzere iki bileşeni vardır. Empedansın sanal ve gerçek bileşenleri (4.4) eşitliği ile verilmiştir (Turan ve diğerleri, 2021).

$$Z = Z' + jZ'' \quad (4.4)$$

Burada Z' empedansın gerçel kısmı olup seri direnci, Z'' ise sanal kısım olup reaktansı vermektedir.

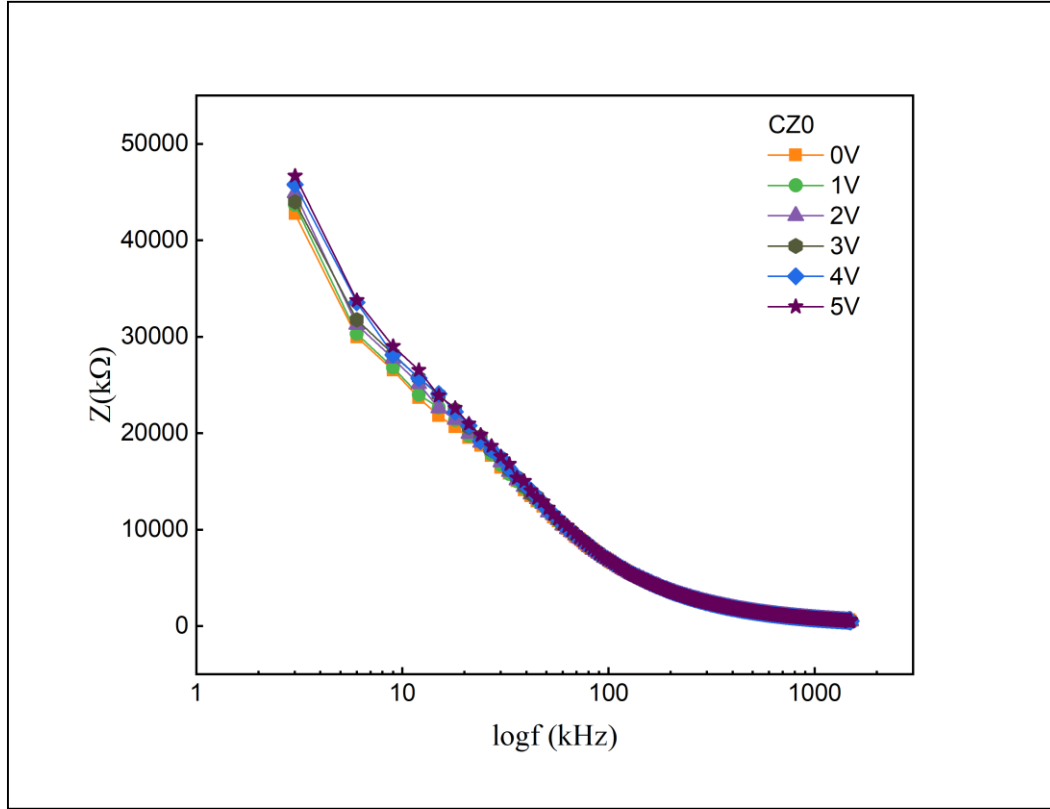
SILAR yöntemi ile üretilen CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerin empedans değerleri kapasitans ve iletkenlik değerleri kullanılarak (4.5), (4.6) ve (4.7) eşitlikleri ile hesaplanmıştır (Turan ve diğerleri, 2021).

$$Z' = \frac{G}{(G^2 + (G\omega)^2)} \quad (4.5)$$

$$Z'' = \frac{-(C\omega)}{(G^2 + (G\omega)^2)} \quad (4.6)$$

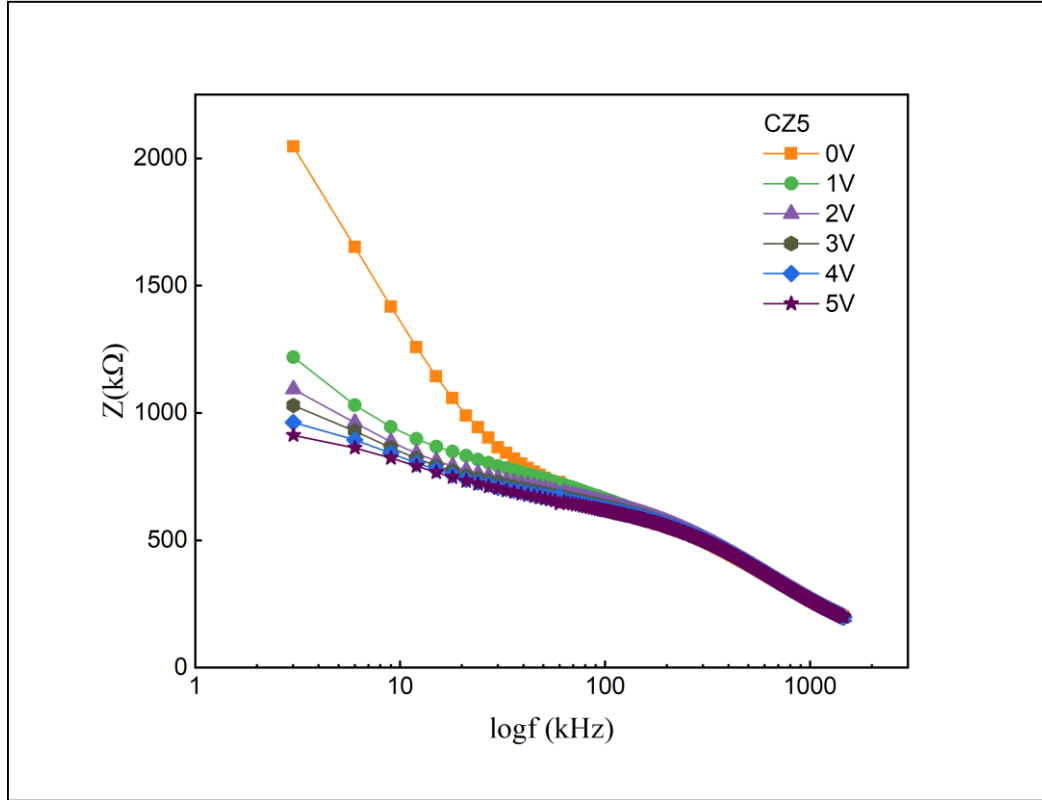
$$Z = \sqrt{Z'^2 + Z''^2} \quad (4.7)$$

Şekil 4.15’de CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında empedans frekans grafiği verilmiştir. CZ0 ince filminin 3kHz frekans değerinde artan bias voltajları ile birlikte empedans değeri 43000 k Ω değerinden 47000 k Ω değerine artmaktadır. 3-40 kHz frekans aralığında artan bias voltajıyla empedans değerinde artış gözlenmektedir. 40 kHz’den itibaren tüm bias voltajlarında empedansta bir değişim olmamaktadır. CZ0 ince filminin empedans değerinin frekansa bağımlılığı iki bölge ile incelenebilir. Birinci bölge 3-100 kHz aralığı empedans değerinde hızlı bir azalma gözlenmektedir. 3-100 kHz’e artan frekansla empedans değerindeki azalmanın en fazla olduğu ikinci bölgedir. Üçüncü bölge 100 kHz-1,5 MHz’e aralığı empedans değerindeki değişimin daha az olduğu bölgedir. 0V bias voltajı altında artan frekansla empedans değeri 43000 k Ω ’dan 480 k Ω ’a azalmıştır.



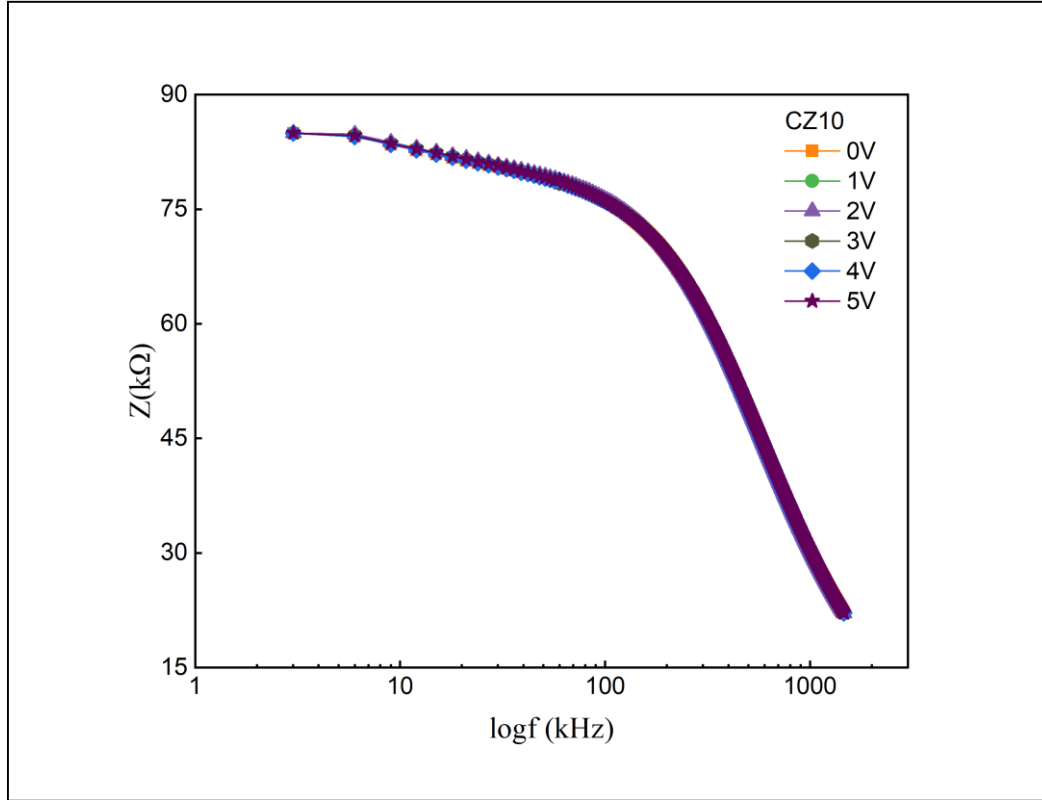
Şekil 4.14. CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında empedans frekans grafiği

Şekil 4.16’te CZ5 ince filminin çeşitli bias voltajlarında empedans frekans grafiği verilmiştir. CZ5 numunesi için 3kHz değerinde frekans değerinde 0- 5V aralığında değişen bias voltajı ile birlikte empedansın değeri 2050 kΩ’dan 915 kΩ’a azalmıştır. 3kHz-30kHz frekans aralığında 0V bias voltajı altında diğer bias voltajlarına göre empedans değerinde daha belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. 3 kHz’den 200 kHz olan frekans değerine kadar artan bias voltajı ile birlikte empedans değerinde azalma söz konusuyken 200 kHz’den itibaren empedansta bias voltajına bağlı bir değişim olmamaktadır. CZ5 numunesinin empedans değerlerinin frekans bağımlılığı üç bölgede incelenebilir. Birinci bölge 3-40 kHz frekans aralığı empedansta hızlı bir azalma olurken ikinci bölge 40-200 kHz frekans aralığında empedans değerindeki azalma miktarı daha azdır. 200kHz’den 1,5Mhz’e kadar olan üçüncü bölgede diğer iki bölgede empedans değerindeki azalma miktarı daha fazladır. 0V bias voltajı altında artan frekansla empedans değeri 2050 kΩ’dan 200 kΩ’a kadar azalmaktadır.



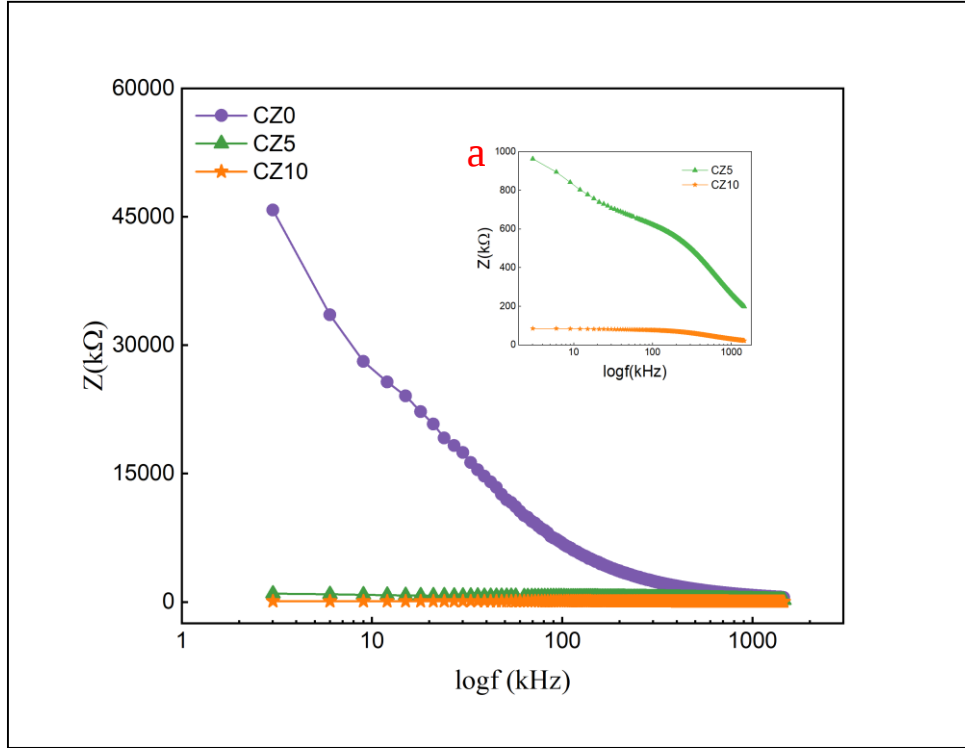
Şekil 4.15. CZ5 ince filminin farklı bias voltajlarında empedans frekans grafiği

Şekil 4.17’te CZ10 ince filminin farklı bias voltajları altında empedans frekans grafiği verilmiştir. CZ10 numunesi 3kHz-1,5MHz frekans aralığında artan bias voltajlarında empedansın değerinde voltaja bağlı değişim olmamaktadır. CZ10 numunesinin frekans bağımlılığı incelendiğinde 3-100 kHz frekans aralığında empedans değerinde değişim az iken 100kHz’den 1,5MHz’e artan frekansla empedans değerindeki değişimin keskin olduğu gözlenmektedir. 0V bias voltajında artan frekansla empedans değeri 85 kΩ’dan 22 kΩ’a azalmaktadır.



Şekil 4.16. CZ10 ince filminin farklı bias voltajlarında empedans frekans grafiği

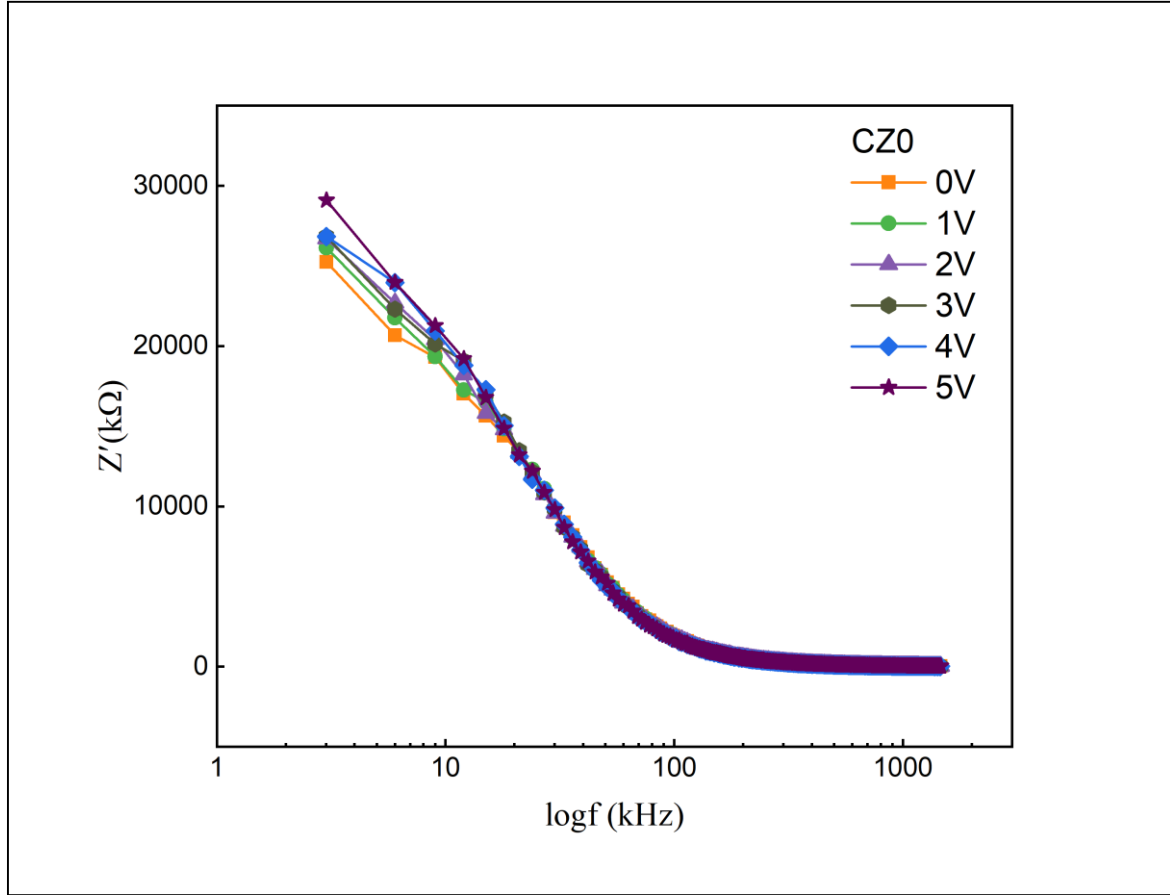
Şekil 4.18’da CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin 4V’taki empedans frekans grafiği verilmiştir. Şekil 4.18’da CZ0 numunesinde 3 kHz ile 200 kHz frekans aralığının da 45000 k Ω ’dan 520 k Ω ’a empedans değerinin düştüğü belirgin bir azalma olduğu CZ5, CZ10 numunelerindeyse empedans CZ0’a oranla değişim daha azdır. CZ0 numunesinin 400 kHz frekans değerinden itibaren empedans değerindeki değişim azdır. Şekil 4.18’da CZ0 numunesinin empedans değeri diğer numunelere göre daha büyük olduğu için hepsinin aynı grafik içindeki davranışları net bir şekilde gözlemlenemediğinden dolayı Şekil 4.18(a)’da CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin 4V’taki empedans frekans grafiği verilmiştir. Şekil 4.18(a) incelendiğinde CZ5 numunesinin empedans değeri 970 k Ω ’dan 200 k Ω ’a CZ10 ince filminde ise 85 k Ω ’dan 22 k Ω ’a azalmaktadır. Başka bir deyişle CZ5 ince filminin CZ10 numunesine göre artan frekansla empedans değerinde daha belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmleri için 4V’taki ölçüm sonuçları incelendiğinde artan katkı oranı ile empedans değerleri azalmaktadır. Artan frekans ile empedans değerleri azalmaktadır. Bu durum arayüzey durumlarından kaynaklanabilir. Elde edilen sonuçlar literatür ile uyushmaktadır (Shaislamov ve diğerleri, 2016).



Şekil 4.17. 4V bias voltajında CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin empedans frekans grafiği.
(a) 4V bias voltajında CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin empedans frekans grafiği

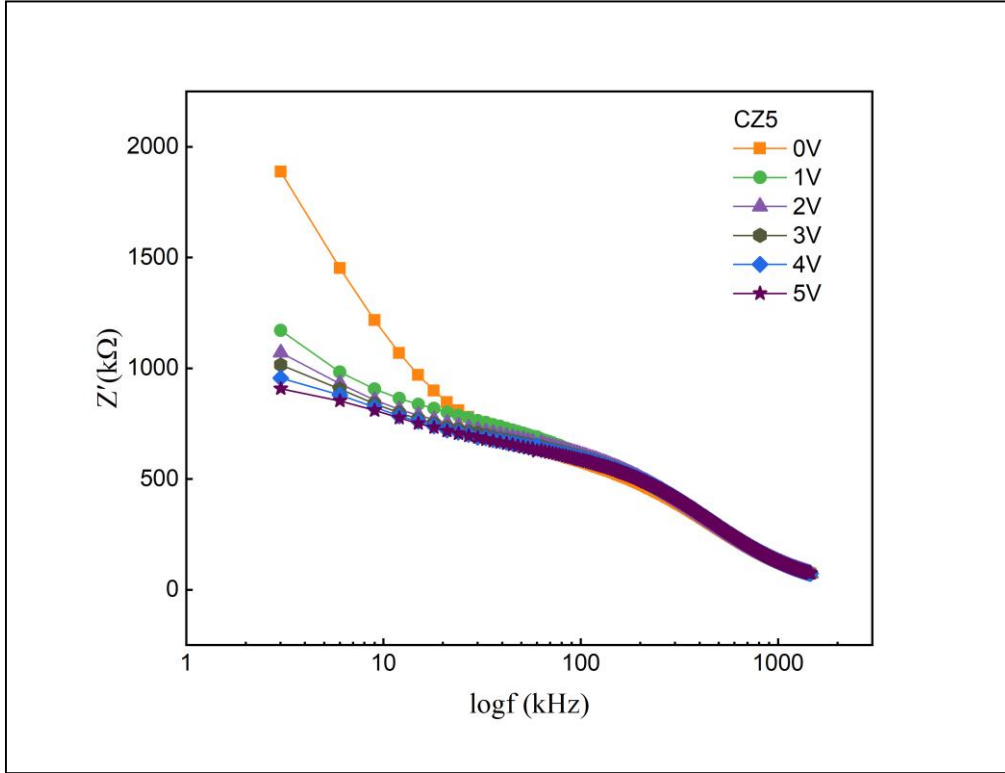
4.3.5. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin farklı voltajlarda empedansın gerçel kısmının frekansa bağlı karakteristikleri

SILAR yöntemi ile üretilen CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerin empedansın gerçel kısmının frekansa bağlılığı incelenmiştir. Şekil 4.19’de CZ0 için farklı bias voltajları altında $Z'-f$ grafiği verilmiştir. CZ0 ince filminin 3kHz frekans değerinde artan bias voltajları ile birlikte empedansın gerçel kısmı 25300 kΩ değerinden 29100 kΩ değerine artmaktadır. 3-20 kHz frekans aralığında artan bias voltajıyla empedansın gerçel kısmı artmakta ve 40 kHz’den itibaren artan frekansla tüm bias voltajlarında empedansın gerçel kısmında değişim olmamaktadır. CZ0 ince filminin empedans değerinin frekansa bağlılığı iki bölge ile incelenebilir. Birinci bölge 3-80 kHz aralığında empedansın gerçel kısmında hızlı bir azalma gözlenmektedir. İkinci bölge 80kHz-1,5MHz’e aralığı empedans gerçel kısmındaki değişimin daha az olduğu bölgedir. 0V bias voltajı altında birinci bölgede empedansın gerçel kısmının değeri 25300 kΩ’dan 4250 kΩ’a ikinci bölgede 4250 kΩ’dan 22 kΩ’a azalmıştır.



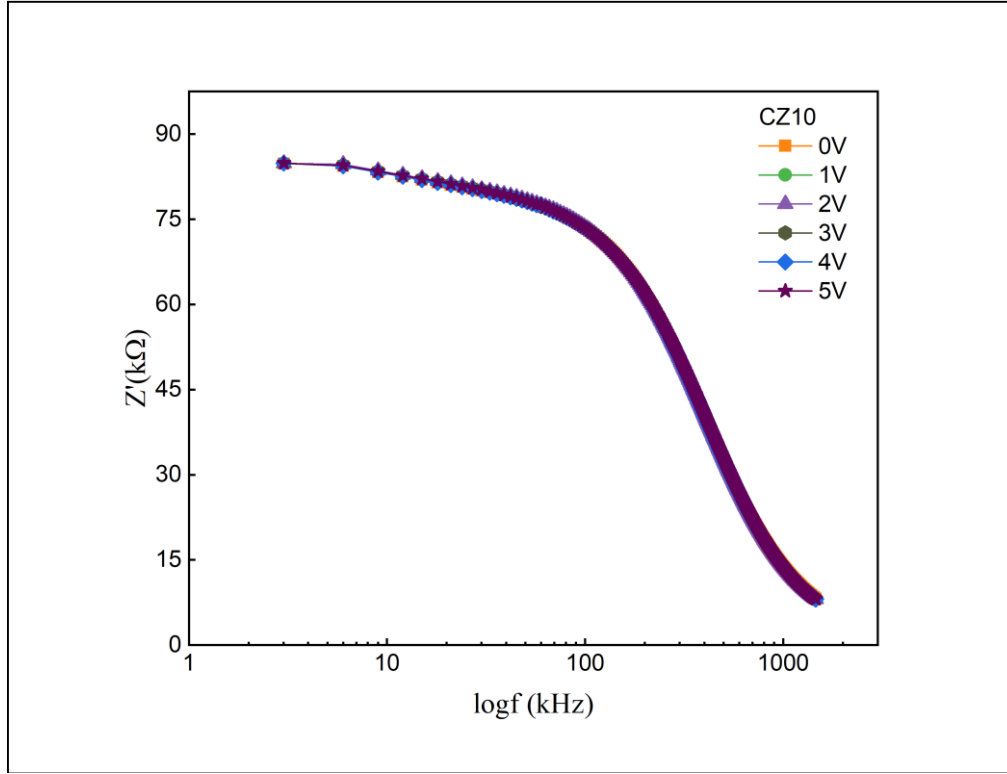
Şekil 4.18. CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında Z'' - f grafiği

Şekil 4.20’de CZ5 ince filminin çeşitli bias voltajları için Z'' - f grafiği verilmiştir. CZ5 için 3kHz değerinde frekans değerinde 0-5V aralığında artan bias voltajı ile birlikte empedansın gerçel kısmının değeri 1900 $k\Omega$ ’dan 910 $k\Omega$ ’a azalmıştır. 3-20 kHz frekans aralığının da 0V bias voltajı altında diğer bias voltajlarına göre empedansın gerçel değerinde daha belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. 3-100 kHz frekans aralığında artan bias voltajı ile birlikte empedans gerçel kısmında azalma olurken 100 kHz’den itibaren bias voltajına bağlı bir değişim olmamaktadır. CZ5 numunesinin empedans değerlerinin frekans bağımlılığı üç bölgede incelenebilir. Birinci bölge 3-30 kHz frekans aralığı empedansın gerçel kısmında hızlı bir azalma olurken ikinci bölge 30-100 kHz frekans aralığında empedansın gerçel kısmındaki azalma miktarı daha azdır. 200kHz’den 1,5MHz’e kadar olan üçüncü bölgede diğer iki bölgeye göre gerçel empedans değerindeki azalma miktarı daha fazladır. 0V bias voltajı altında artan frekansla empedans gerçel kısmının değeri 1900 $k\Omega$ ’dan 72 $k\Omega$ ’a kadar azalmaktadır.



Şekil 4.19. CZ5 ince filminin farklı bias voltajlarında $Z'-f$ grafiği

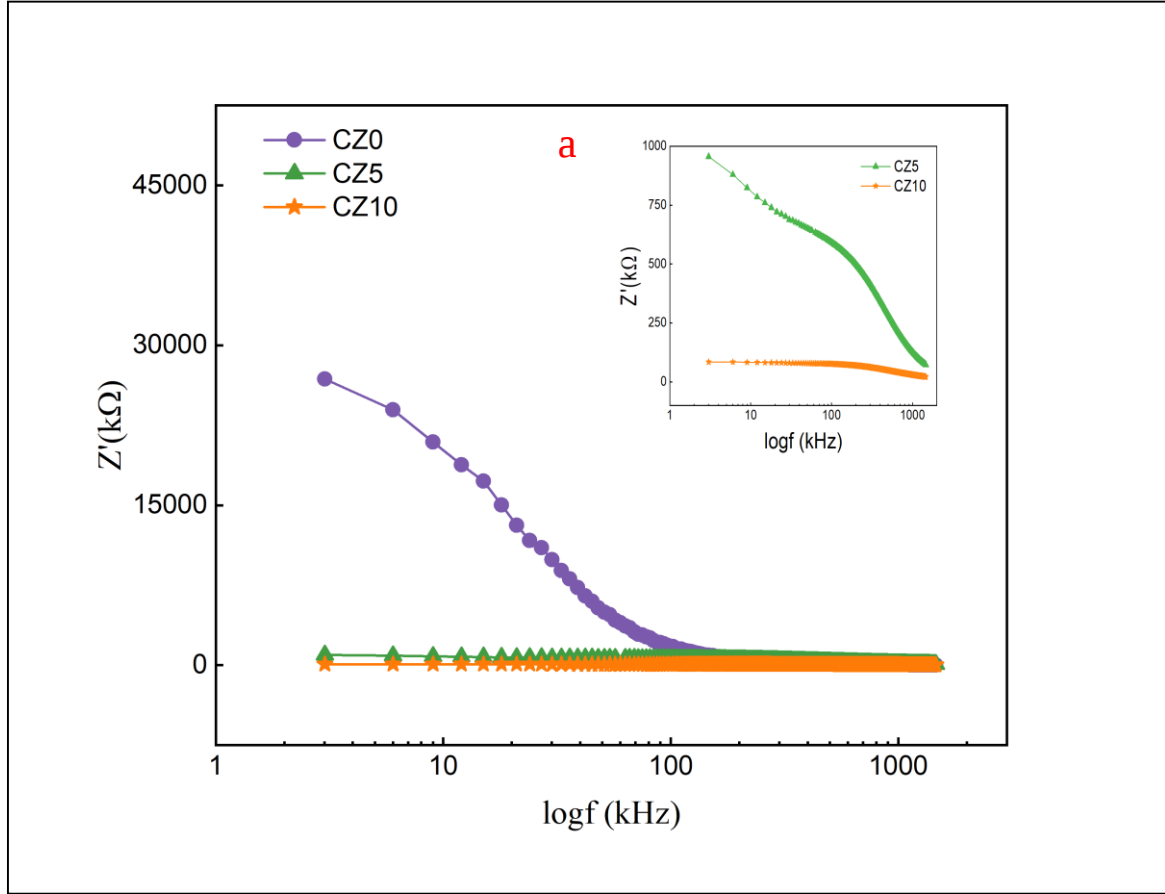
Şekil 4.21'da CZ10 ince filminin farklı bias voltajlarında $Z'-f$ grafiği verilmiştir. CZ10 numunesi 3kHz-1,5MHz frekans aralığında artan bias voltajlarında empedansın değerinde voltaja bağlı değişim yoktur. CZ10 numunesinin frekans bağımlılığı incelendiğinde 3-100 kHz frekans aralığında empedansın gerçel kısmının değeri 85 kΩ'dan 75 kΩ'a düşmüş olup değişim az iken 100kHz'den 1,5MHz'e artan frekansla empedansın gerçel kısmının 75 kΩ'dan 22 kΩ'a değerine azaldığı ve değişimin keskin olduğu gözlenmektedir.



Şekil 4.20. CZ10 ince filminin farklı bias voltajlarında Z'' - f grafiği

Şekil 4.22' de CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin 4V'taki Z' - f grafiği verilmiştir. Şekil 4.22'de CZ0 için 3-200 kHz frekans aralığının da 25600 kΩ'dan 20 kΩ'a düştüğü empedans gerçel kısmında belirgin bir azalma olduğu CZ5, CZ10 numunelerinde ise CZ0'a oranla empedansın gerçel kısmındaki değişimin daha az olduğu görülmektedir. CZ0 numunesinin için 200 kHz 1,5MHz frekans aralığında empedansın gerçel kısmındaki değişim azdır. Şekil 4.22'de CZ0 için empedansın gerçel kısmındaki değişim diğer numunelere göre daha büyük olduğu ve hepsinin aynı grafik içindeki davranışları net bir şekilde gözlemlenemediğinden dolayı Şekil 4.22(a)'da CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin 4V'taki empedansın Z' - f grafiği verilmiştir. Şekil 4.22(a) incelendiğinde CZ5 numunesinin empedans değeri 960 kΩ'dan 75 kΩ'a CZ10 ince filminde ise 85 kΩ'dan 22 kΩ'a azalmaktadır. CZ5 ince filminin CZ10 numunesine göre artan frekansla empedans değerinde daha belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmleri için 4V'taki ölçüm sonuçları incelendiğinde artan katkı oranı ile Z' değerleri azalmaktadır. CZ0, CZ5 ve CZ10 numuneleri için empedansın gerçel kısmındaki değişimler ince filmlerde oluşan tane ve tane sınırı arayüzeyindeki yüklerin birikiminden kaynaklanabilir. Her üç ince filmde de görüldüğü üzere artan frekans değerleri ile Z' değerlerinde oluşan azalma uzay yükünün gevşemesinden kaynaklı olabilir (Lobo ve Ruban Kumar, 2019). Her üç filmin frekansa bağlı grafikleri

incelendiğinde artan frekansla empedans değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu azalma yüklerin yoğunluğunda meydana gelen azalma ve yük taşıyıcılarının hareketliliğinin artmasıyla açıklanabilir (Tiss ve diğerleri, 2021).

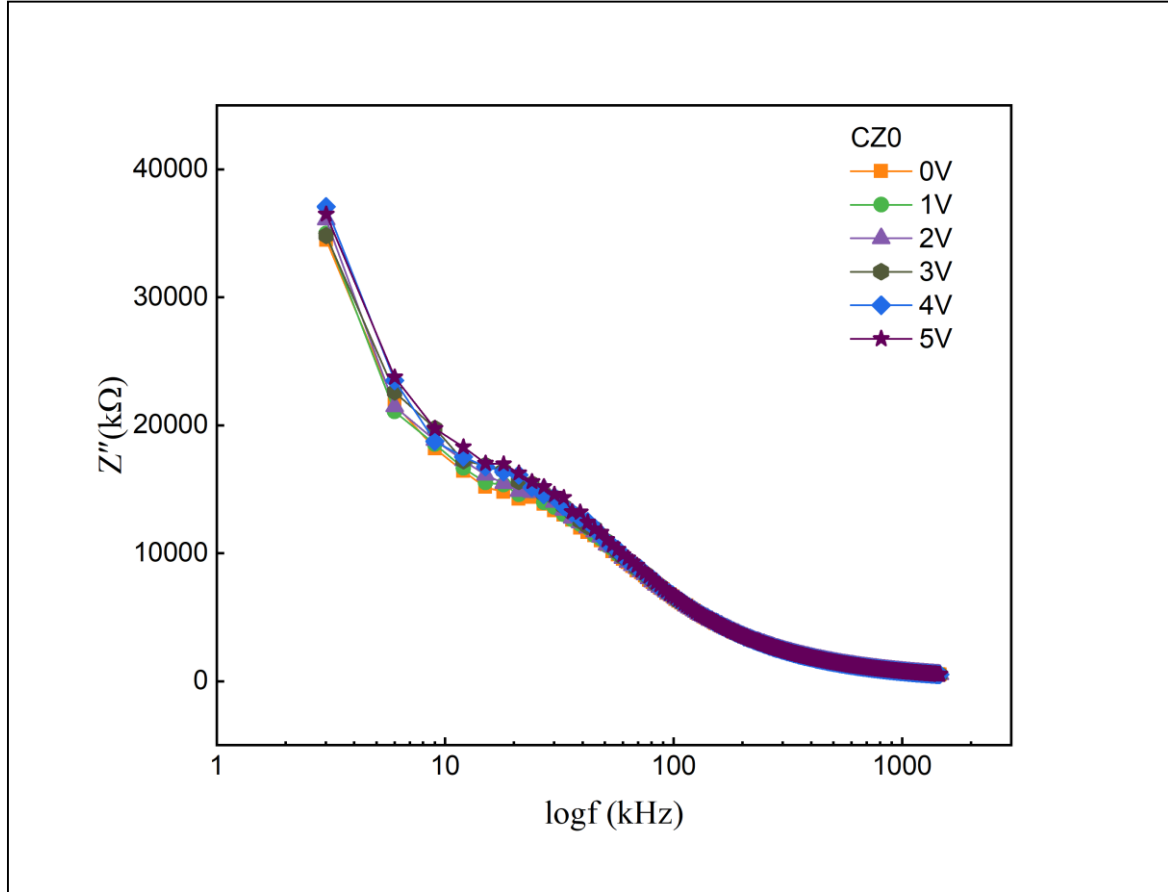


Şekil 4.21. 4V bias voltajında CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin $Z'-f$ grafiği (a) 4V bias voltajında CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin $Z'-f$ frekans grafiği

4.3.6. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin farklı voltajlarda empedansın sanal kısmının frekansa bağlı karakteristikleri

SILAR yöntemi ile üretilen CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerin empedansın sanal kısmının frekansa bağlılığı incelenmiştir. Şekil 4.23'de CZ0 ince filminin çeşitli bias voltajları altında $Z''-f$ grafiği verilmiştir. CZ0 ince filminin 3kHz frekans değerinde 0V'dan 5V'a artan bias voltajları ile empedansın sanal kısmının değeri 35000 kΩ değerinden 36500 kΩ değerine artmaktadır. 3-60 kHz frekans aralığında artan bias voltajıyla empedans değerinde artış olmakta, 60 kHz'den itibaren tüm bias voltajlarında empedansın sanal kısmının voltaja bağlı olmadığı görülmektedir. CZ0 ince filminin empedansın sanal kısmının frekansa bağlılığı 3-15 kHz aralığı empedans sanal kısmında hızlı bir azalmanın olduğu birinci bölge, 15-100

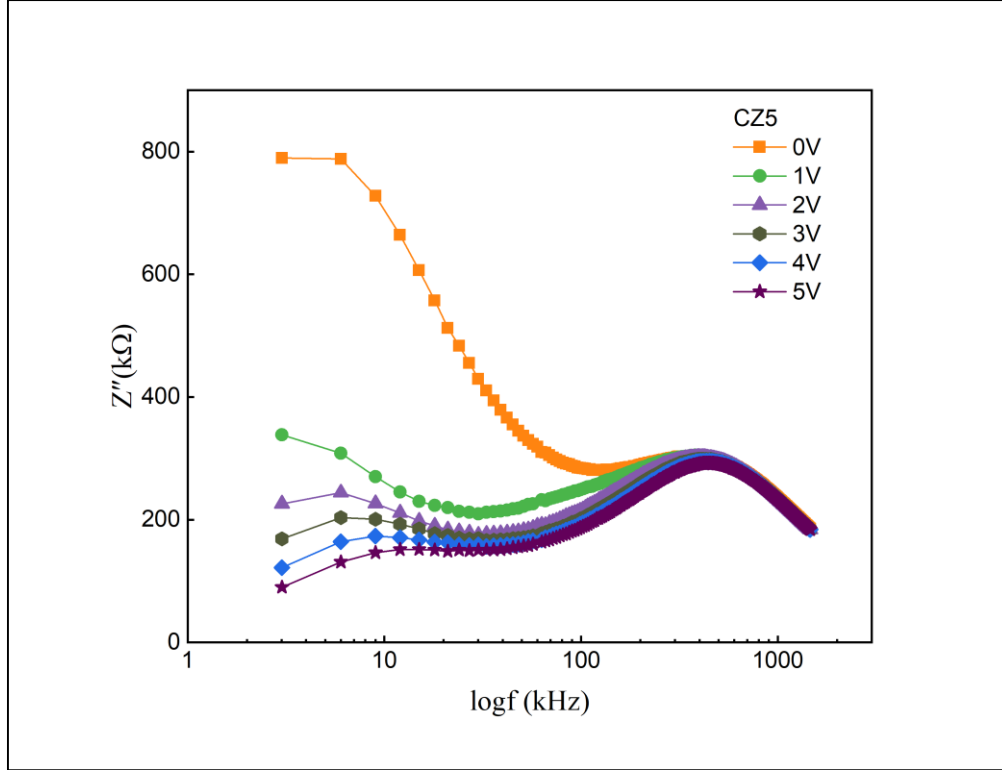
kHz'e artan frekansla empedans sanal kısmındaki değişimin az olduğu ikinci bölge ve 100 kHz-1,5 MHz'e aralığı değişimin en az olduğu üçüncü bölge ile incelenebilir. 0V bias voltajı altında artan frekansla empedans sanal kısmının değeri 35000 k Ω 'dan 520 k Ω 'a azalmıştır.



Şekil 4.22.CZ0 ince filminin farklı bias voltajlarında Z'' - f grafiği

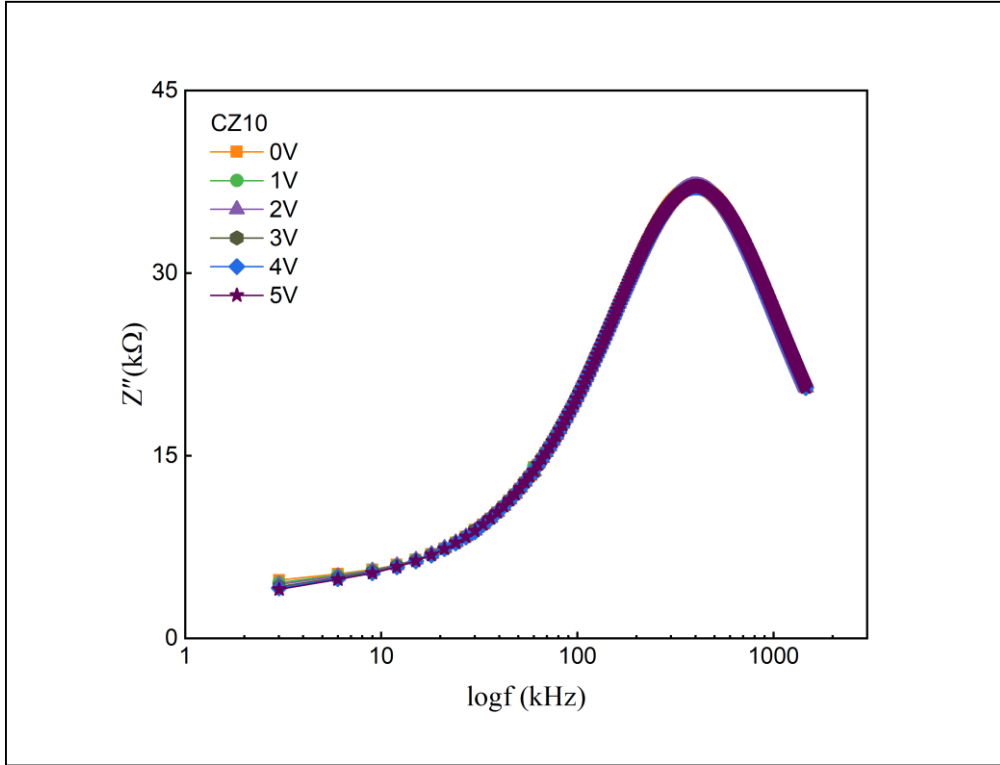
Şekil 4.24'de CZ5 ince filminin farklı bias voltajlarında Z'' - f grafiği verilmiştir. CZ5 ince filminin 3kHz frekans değerinde 0V'dan 5V'a artan bias voltajları ile empedansın sanal kısmının değeri 790 k Ω değerinden 90 k Ω değerine azalmıştır. 3-6kHz frekans aralığının da 0V'dan 1V'a artan bias voltajıyla empedansın sanal kısmında azalma gözlemlenirken 2V'dan 5V'a artan bias voltajıyla empedansın sanal kısmında artış gözlenmektedir. 0V bias voltajı altında empedansın sanal kısmında 10-100kHz arasında artan frekansla diğer bias voltajlarına göre keskin bir azalma olmakta ve 100-400 kHz arasında empedansın sanal kısmında artış gözlenmektedir. 10kHz-35kHz aralığının da 1V-5V artan bias voltajı ile empedansın sanal kısmının değerlerinde azalma olmaktadır. 35 kHz'den 400 kHz'e artan frekansla 1-4V arası artan bias voltajlarında empedansın sanal kısmının arttığı 400kHz-1,5MHz aralığında ise tüm bias voltajlarında empedansın sanal kısmının voltaja bağlı

olmadığı görülmektedir. Empedansın sanal kısmının frekansa bağımlılığı incelendiğinde 3-8kHz aralığında empedansın sanal kısmının değerinde artış meydana gelmekte ve ilk tepe bu bölgede oluşmaktadır. 8-35kHz aralığında empedansın sanal kısmında frekansa azalma olmaktadır. 35-100kHz aralığında artan frekansla empedansın tekrar artışı ikinci tepenin olduğu ve genişliğinin ilk tepeye göre daha geniş olduğu görülmektedir. 400kHz-1,5MHz aralığında ise empedans değerinin tekrar azalmaya başladığı gözlenmiştir.



Şekil 4.23. CZ5 ince filminin v farklı bias voltajlarında Z'' - f grafiği

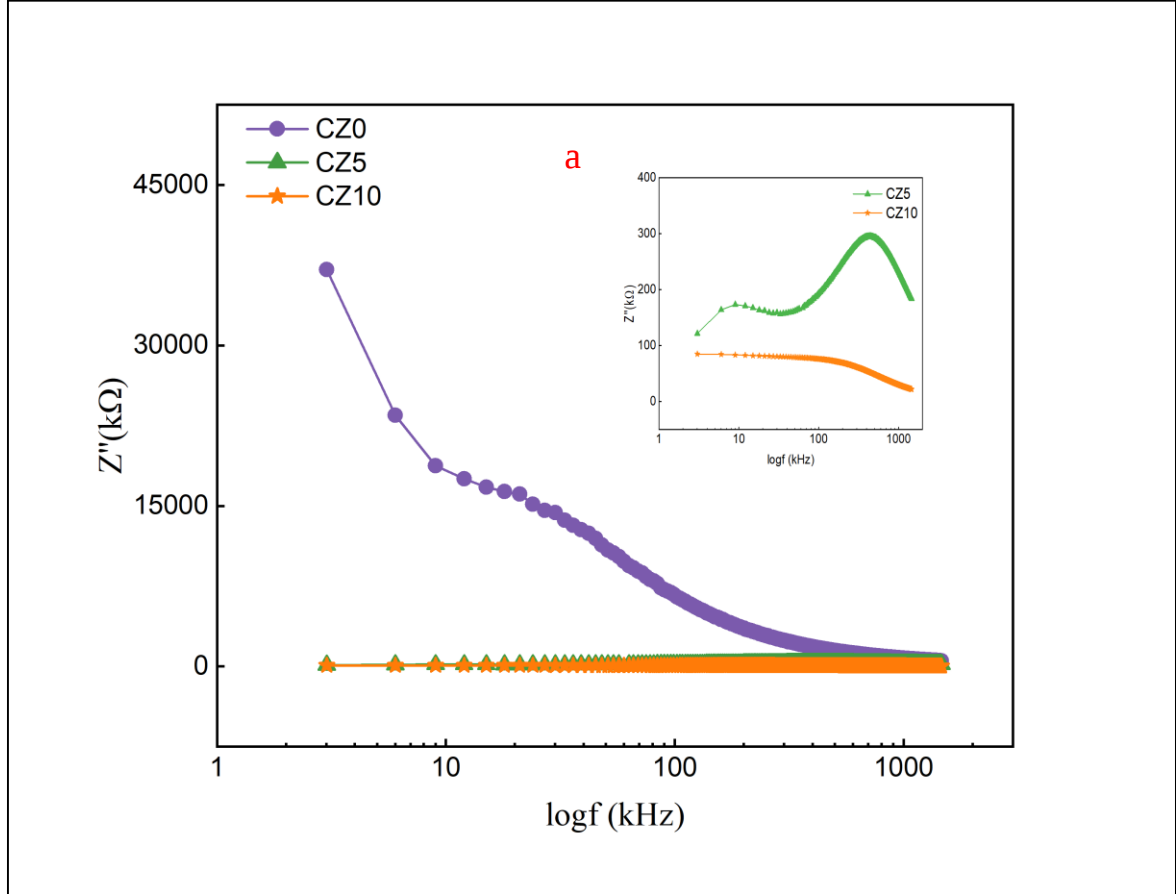
Şekil 4.25'de CZ10 ince filminin farklı bias voltajlarında Z'' - f grafiği verilmiştir. CZ10 numunesi 3kHz frekans değerinde 0-5V'a artan bias voltajı ile empedansın sanal kısmı 5kΩ'dan 4kΩ'a azalmaktadır. 10kHz-1,5MHz frekans aralığında artan bias voltajlarında empedansın değerinde voltaja bağlı değişim yoktur. CZ10 numunesinin frekans bağımlılığı incelendiğinde 3kHz'den 400kHz'e artan frekansla empedansın sanal kısmı artmaktadır. 400kHz frekansta empedansın sanal kısmı tepe noktasına ulaşmış 37 kΩ değerini almıştır. 400kHz-1,5MHz frekans aralığında artan frekansla lineer bir değişim gözlemlenmiş ve empedansın sanal kısmının değeri 37 kΩ'dan 20 kΩ'a azalmıştır.



Şekil 4.24. CZ10 ince filminin farklı bias voltajlarında Z'' - f grafiği

Şekil 4.26' da CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin 4V'taki Z'' - f grafiği verilmiştir. Şekil 4.26' da CZ0 için empedansın sanal kısmı artan frekansla empedans değeri azalmaktadır. CZ5, CZ10 numunelerinde CZ0'a oranla empedansın sanal kısmındaki değişimin daha az olduğu gözlenmektedir. 4.26'da CZ0 için empedansın sanal kısmındaki değişim diğer numunelere göre daha büyük olduğu ve hepsinin aynı grafik içindeki davranışları net bir şekilde gözlemlenemediğinden dolayı Şekil 4.26(a)'da CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin 4V'taki empedansın Z'' - f grafiği verilmiştir. CZ5 ince filminin Z'' değerleri incelendiğinde 6 kHz'de empedansın sanal kısmının değeri 200 $k\Omega$, 400 kHz'de empedansın sanal kısmının değeri 295 $k\Omega$ olduğu iki tepe görülmektedir. Bu bölgelerde empedansın değeri arttığı tepelerin genişlediği gözlenmektedir. Bu iki pik CZ5 numunesine ait iki tane gevşeme zamanı olduğunu gösterebilir. CZ10 ince filminin Z'' grafiğinde 410 kHz frekansında empedansın değerinin 37 $k\Omega$ olduğu bir pik görülmektedir. Katkılama ile beraber pikin yüksek frekans bölgesine doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Sonuçların literatürle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir (Saxena ve diğerleri, 2020). CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin empedansın sanal kısmındaki değişimler incelendiğinde belirli frekans bölgelerinde piklerin oluştuğu ve genel olarak empedansın sanal kısmının bu davranışı oksitli yapılarda gevşeme mekanizmasına atfedilir. Oksidasyon durumlarında oluşan değişikliklerden kaynaklı olarak

oksijen boşlukları meydana gelmektedir. Bu boşluklar gevşeme olgusunu değiştirmesi ile açıklanabilir (Lobo ve Ruban Kumar, 2019). Ayrıca bu piklerin oluştuğu frekans bölgesi gevşeme frekansı olarak belirtilirken dielektrik gevşeme olarak da atfedilebilir (Tiss ve diğerleri, 2021).

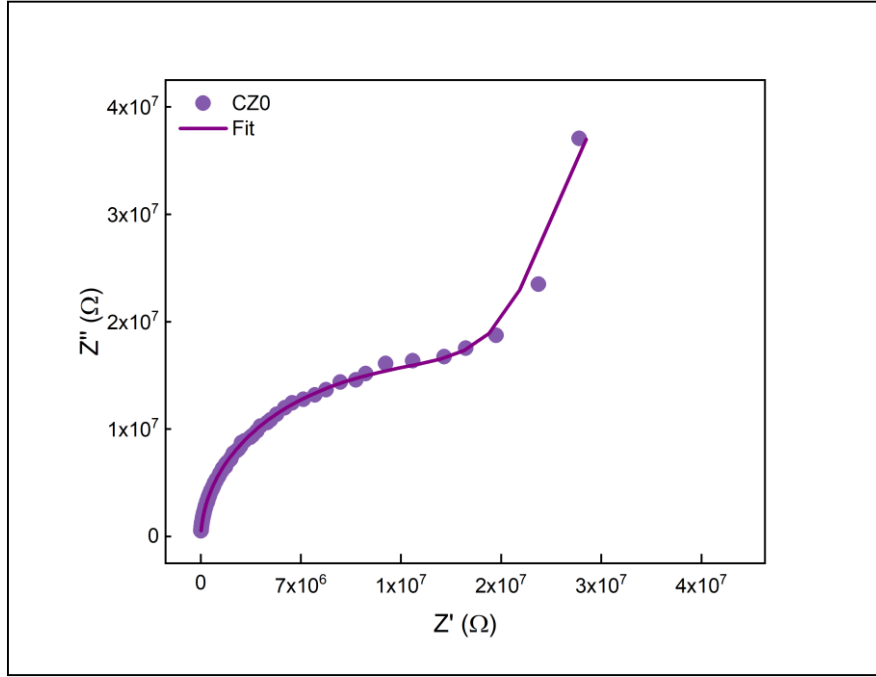


Şekil 4.25. 4V bias voltajında CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin Z'' - f grafiği (a) 4V bias voltajında CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin Z'' - f frekans grafiği

4.3.7. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin 4V Nyquist eğrileri

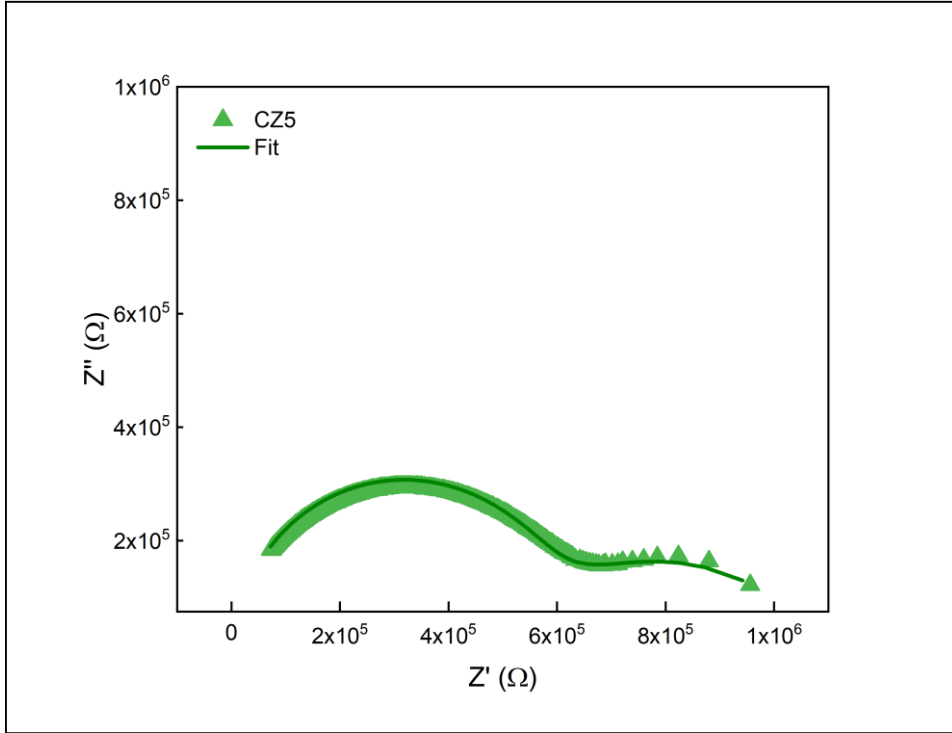
Nyquist eğrileri malzemelerin elektriksel doğasını açıklamak için kullanılan ideal bir yaklaşımdır (Seçkin ve diğerleri, 2022). Nyquist eğrilerinde elektrot, tane sınırı ve tane etkileri gözlemlenir. Tane ve tane sınırı etkileri yarım daire ile, elektrot etkisi ise 45° lik lineer eğriyle açıklanır. SILAR yöntemi ile üretilen CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerin Nyquist eğrileri (Z'' - Z') ve ZView programı ile elde edilen fit eğrileri Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da verilmiştir. Şekil 4.27'de verilen CZ0 ince filminin Z'' - Z' grafiği incelendiğinde iç içe geçmiş iki yarım daire gözlemlenmektedir. Düşük frekans bölgesindeki yarım dairenin çapı yüksek frekans bölgesindeki yarım dairenin çapından daha büyüktür.

Düşük frekans bölgesindeki yarım dairenin çapının yüksek frekans bölgesindeki yarım dairenin çapından daha büyük olması tane sınırı etkisinin tane etkisinden daha baskın olduğunu gösterir.



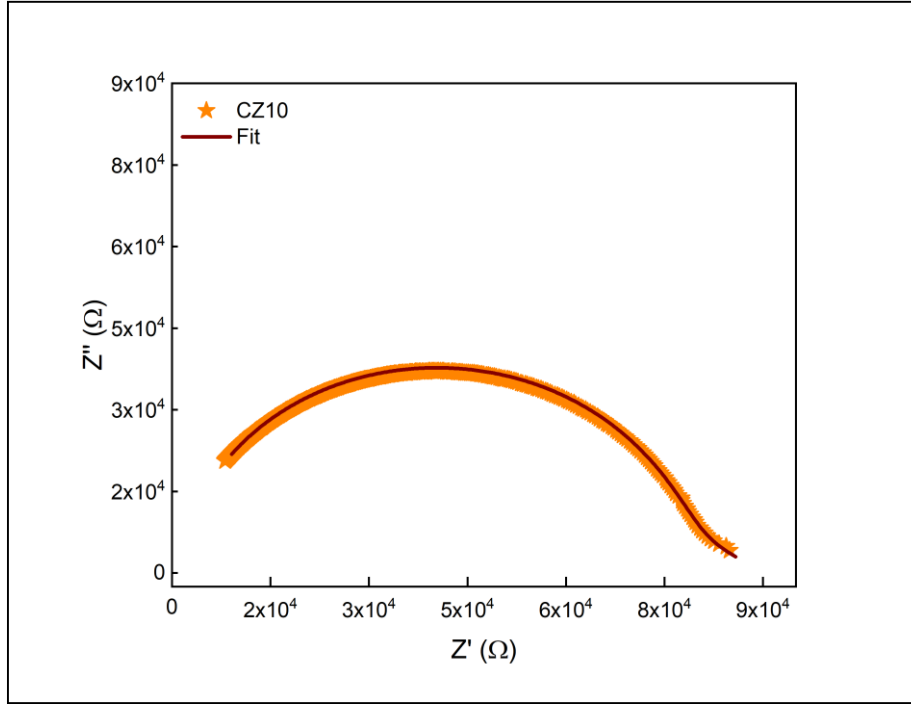
Şekil 4.26. Z0 ince filminin Z'' - Z' grafiği

Şekil 4.28'de verilen CZ5 ince filminin Nyquist eğrileri incelendiğinde iç içe geçmiş iki basık yarım daire gözlemlenmiştir. Yüksek frekans bölgesindeki dairenin çapı düşük frekans bölgesindeki dairenin çapından daha büyüktür. Yüksek frekans bölgesindeki yarım dairenin çapının düşük frekans bölgesindeki yarım dairenin çapından büyük olması tane etkisinin tane sınırı etkisinden daha baskın olduğunu gösterir (Ghosh, Kumari, Choudhury, Tewari ve Bhattacharjee, 2022).



Şekil 4.27. CZ5 ince filminin Z'' - Z' grafiği

Şekil 4.29'da verilen CZ10 ince filminin Nyquist eğrileri incelendiğinde yüksek frekans bölgesinde basık yarım daire belirgin bir şekilde gözlemlenirken yarım dairenin bittiği yerde görülen yay şeklindeki eğri düşük frekans bölgesinde ölçüm aralığı dışında kalan ikinci bir dairenin oluştuğunu gösterir. Yüksek frekans bölgesindeki yarım dairenin çapının düşük frekans bölgesindeki yarım dairenin çapından büyük olması tane etkisinin tane sınırı etkisinden daha baskın olduğunu gösterir.

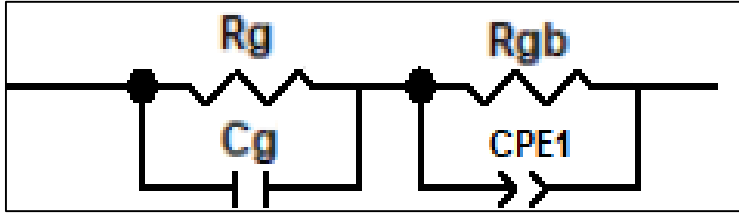


Şekil 4.28. CZ10 ince filminin Z'' - Z' grafiği

CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerin Nyquist eğrileri incelendiğinde oluşan bu yarım daireler ince filmlerde oluşan tane ve tane sınırı etkilerinden kaynaklanmaktadır (Díaz-Flores ve diğerleri, 2003; Ghosh ve diğerleri, 2022). Ayrıca Nyquist eğrilerinde baskılanmış yarım dairenin oluşumu Debye olmayan iletim süreçlerine atfedilebilir (Ahmad ve Maqsood, 2021; Turan ve diğerleri, 2021).

Nyquist eğrilerinde oluşan yüksek frekans bölgelerindeki yarım daire tane etkisi, düşük frekans bölgelerinde oluşan yarım daire ise tane sınırı etkisinden kaynaklanabilir. SILAR yöntemiyle üretilen CZ0, CZ5 VE CZ10 numunelerinin Nyquist eğrilerinde 3kHz-1,5MHz frekans aralığında çapları farklı iki yarım daire görülmektedir. CZ0 numunesinde yüksek frekans bölgesindeki yarım dairenin çapı düşük frekans bölgesine kıyasla daha küçüktür. Katkı oranının artmasıyla Nyquist eğrilerinde oluşan yarım dairelerin çapları azalmaktadır. Düşük frekans bölgesinde görülen dairenin çapı azalarak CZ5 numunesinde daha belirgin gözlemlenirken CZ10 örneğinde ise bu yarım daire ölçüm aralığımızın dışındaki daha düşük frekanslara doğru kaymıştır. CZ0 ince filminde tane sınırı etkisi daha baskınken katkı oranının artmasıyla tane etkisi artmıştır.

CZ0, CZ5 ve CZ10 için ZView programı kullanılarak fit edilen devre şeması Şekil 4.30. verilmiştir.



Şekil 4.29. CZ0, CZ5 ve CZ10 için ince filminin devre modeli

Şekil 4.30’da verilen devreki devre elemanlarının her birinin AC sinyaline karşı gösterdiği tepkinin toplamı empedans olarak isimlendirilir. Devre direnç , kondansatör ve sabit faz elemanından (CPE) oluşmaktadır. Paralel R_g - C_g ve paralel R_{gb} -CPE devre elemanları birbirlerine seri olarak bağlıdır. Devredeki paralel R_g - C_g tane, paralel R_{gb} -CPE ise tane sınırı etkisini temsil eder. C’nin devredeki tepkisi kapasitif reaktans (X_c) olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi verilir.

$$X_c = \frac{1}{i\omega C} \quad (4.8)$$

Mikroskobik seviyede üretilen malzemeler çok sayıda yüzey kusuru ve yük homojensizliği içermektedir. Eğer üretilen malzemeler çok düzenli olsaydı malzemede meydana gelen değişiklikler sabit fazlı olması beklenebilirdi fakat bu kusurlar malzemenin sabit fazlı olmasını engeller ve CPE’yi ortaya çıkarır. CPE’de direnç ve kapasitans katkıları farklılık gösterir ve aşağıdaki gibi verilir (Cesiulis, Tsyntsar, Ramanavicius ve Ragoisha, 2016; Locorotondo ve diğerleri, 2019).

$$CPE = \frac{1}{\omega^n Q e^{in\pi/2}} \quad (4.9)$$

Yukarıda verilen Q değerinin birimi Farad’dır, n ise -1 ile 1 arasında değer alır. n’nin -1 olması durumunda CPE elemanı ideal bir bobin gibi davranır. n’nin 1 olması durumunda CPE elemanı ideal bir kondansatör gibi davranırken, n’nin 0 olması durumunda CPE ideal bir direnç olarak davranır (Locorotondo ve diğerleri, 2019).

Şekil 4.30’da verilen devre modelinin analitik çözümü eşitlik (4.10) ve (4.11)’de verilmiştir.

$$Z' = \frac{R_g}{1 + \omega^2 R_g^2 C_b^2} + \frac{R_{gb}[1 + \omega^2 R_{gb} Q \cos(n\pi/2)]}{[1 + \omega^n R_{gb} Q \cos(n\pi/2)]^2 + [\omega^n R_{gb} Q \sin(n\pi/2)]^2} \quad (4.10)$$

$$Z'' = \frac{R_g^2 \omega C_g}{1 + \omega^2 R_g^2 C_g^2} + \frac{\omega^2 R_{gb} Q \sin(n\pi/2)}{[1 + \omega^n R_{gb} Q \cos(n\pi/2)]^2 + [\omega^n R_{gb} Q \sin(n\pi/2)]^2} \quad (4.11)$$

CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin devre modelinde devre elemanlarının aldığı değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Katkı oranının artmasıyla R_g ve R_{gb} ’nin değerleri azalırken C_g ve Q ’nun değerleri artmaktadır. n değeri ise katkı oranının artmasıyla azalmaktadır.

Çizelge 4.2. ZView ile fit edilen devre modeliyle hesaplanan devre elemanlarının parametreleri

	R_g	R_{gb}	C_g	Q	n
ZC0	$1,98 \times 10^7$	$5,8 \times 10^8$	$2,8 \times 10^{-13}$	$3,9 \times 10^{-12}$	0,90
ZC5	$5,5 \times 10^5$	$5,4 \times 10^5$	$5,6 \times 10^{-13}$	$1,45 \times 10^{-9}$	0,65
ZC10	$7,0 \times 10^4$	$2,0 \times 10^4$	$5,0 \times 10^{-12}$	$1,8 \times 10^{-7}$	0,45

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında SILAR yöntemi ile üretilen CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin XRD ve SEM gibi yöntemlerle yapısal ve morfolojik özellikleri incelenmiştir. CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmleri farklı voltajlarda kapasitans ve iletkenlik karakteristikleri ve bu karakteristiklerden hesaplanan seri direnç değerleri ile birlikte üretilen tüm ince filmlerin empedans ve empedansın bileşenleri hesaplanarak Cd katkısının ince filmlerdeki etkisi araştırılmıştır.

Üretilen CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerinin yapısal ve morfolojik özellikleri incelendiğinde ince filmlerin ölçüm sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu, ZnO yapısında Cd ait safsızlık piki gözlenmemiş ve Cd katkısı ince filmlerde yapısal olarak bir değişikliğe yol açmamıştır. Morfolojik yapıda Cd katkısı ile çubuk şeklindeki yapıların küre şeklindeki yapılara dönüştüğü yapısal olarak değişikliğe sebep olduğu görülmüştür.

CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerin farklı bias voltajlarında $C-f$ karakteristikleri incelenmiştir. Düşük frekans bölgelerinde artan bias voltajı ile kapasitansın azaldığı, yüksek frekans bölgelerinde ise bias voltajına bağımlı değildir. Her üç ince filmin belli frekans değerine kadar frekans değeri arttıkça kapasitans değeri azaldığı görülürken, yüksek frekanslarda kapasitans değerlerinde belirgin bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Bu durum ara yüzey durumlarının varlığından kaynaklanmasına atfedilirken, yüksek frekanslarda belirgin bir değişim gözlenmemesinin sebebi ise AC sinyali takip edemeyen yük taşıyıcılarına atfedilmiştir. Ayrıca katkı oranına bağlı olarak kapasitans artış görülmesi katkılamanın kapasitif özelliği arttırdığı şeklinde yorumlanmıştır.

Her üç ince filmin farklı bias voltajları altında $G-f$ karakteristikleri incelendiğinde CZ0 numunede artan bias voltajı ile iletkenliğin azaldığı ve CZ5 numunesinde artan bias voltajıyla iletkenlik değerinin arttığı gözlemlenirken, CZ10 numunesinde bias voltajına bağımlılık görülmemektedir. Üç ince filmde artan frekans değerleri ile iletkenlik değerleri artmıştır. Düşük frekans bölgelerinde iletkenlik değerlerinin az olmasının sebebi zayıf frekanstan kaynaklandığı düşünülmektedir. Katkılamaya bağlı olarak iletkenliğin katkı oranı arttıkça artması iletkenlik özelliğinin arttırdığı şeklinde düşünülmüştür.

Katkılı ve katkısız ince filmlerin hesaplanan seri direnç değerleri incelendiğinde CZ0 ve CZ5 bias voltajı altındaki tepkilere bakıldığında; CZ0'da bias voltajının artması ile seri direnç etkisi artarken, CZ5'de bias voltajının artması ile beraber seri direnç etkisi azalmıştır. CZ0 ve CZ5 numunelerinde yüksek frekans bölgelerinde bias voltajına bağımlılık görülmemektedir. CZ10'da bias voltajına bağımlılık yoktur. İnce filmlerin artan frekansla seri direnç değeri azalmıştır. Üç ince film için düşük frekans bölgesinde seri direnç değerinde azalma çok daha belirginken yüksek frekans bölgesindeki seri direnç değerindeki azalma daha düşüktür. Düşük frekans bölgelerinde seri direnç etkisinin fazla olması bu bölgelerde polarizasyon ve arayüzey durumlarının daha etkili olması ile açıklanabilir. Tüm ince filmlerde artan katkı oranı ile seri direnç etkisinin azalması katkılamanın seri direnç etkisini azalttığı yönünde açıklanmıştır.

CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerin kapasitans ve iletkenlik değerlerinden hesaplanan empedans değerleri incelendiğinde belli frekans değerlerine kadar CZ0 ve CZ5 ince filmleri düşük frekans bölgelerinde bias voltajına bağlı olduğu yüksek frekans bölgelerinde ise bias voltajından bağımsız olduğu gözlemlenmiştir. CZ10 ince filmi için empedans değerleri bias voltajından bağımsız olduğu görülmüştür. Ayrıca tüm ince filmler için artan frekans ile empedans değeri azalmaktadır. Bu durum arayüzey durumlarının varlığına atfedilmiştir. Katkılamaya bağlı empedans değerleri incelendiğinde artan katkı oranı ile empedans değerinin azaldığı görülmüştür.

Her üç ince filmin empedansın gerçel kısmının grafikleri incelendiğinde düşük frekans bölgesinde CZ0 için artan bias voltajıyla empedansın gerçel kısmının değerinin arttığını, CZ5 için artan bias voltajıyla empedansın gerçel kısmında artmakta ve yüksek frekans bölgelerinde ise bias voltajından bağımsız olduğu gözlemlenmiştir. CZ10 ince filmi için empedansın gerçel kısmının değerinin bias voltajından bağımsız olduğu görülmüştür. İnce filmlerin frekansa bağımlılığı incelendiğinde artan frekans değerleri ile empedansın gerçel kısmının azaldığı görülmektedir. Bu durum tane ve tane sınırı etkilerinden kaynaklı olabileceğine ve oluşan azalmanın uzay yükünün gevşemesine atfedilmiştir. Ayrıca her üç ince filmin katkılamaya bağlı olarak empedansın gerçel kısmındaki değişime bakıldığında artan katkı oranı ile azaldığı görülmektedir.

CZ0, CZ5 ve CZ10 ince filmlerin empedansın sanal kısmı grafikleri incelendiğinde CZ0 için düşük frekans bölgesinde oluşmaya başlayan ve yüksek frekans oluşmuş olan iki pik vardır.

CZ5 için düşük ve yüksek frekans bölgelerinde olmak üzere iki pik görülmektedir. Bu durum numunenin iki gevşeme süreci olduğuna atfedilir. CZ10 için yüksek frekans bölgesinde oluşan bir pik görülmektedir. Bu piklerin oluşumu oksit yapılarda gevşeme mekanizmasına atfedilirken her katkı oranında farklı pikler görülmesinin sebebi, oksit boşluklarından kaynaklanan gevşeme olgusunun değişmesine atfedilir.

Her üç ince filmin Nyquist eğrileri incelendiğinde düşük frekans bölgelerinde görülen yarım daire tane, yüksek frekans bölgelerinde görülen yarım daire ise tane sınırı etkisine atfedilmiştir. CZ0 numunesinde tane sınırı etkisi daha baskınken katkılamayla birlikte, CZ5,CZ10 numunelerinde tane etkisi baskın hale gelmiştir. ZView ile fit edilen devre modeliyle hesaplanan devre elemanlarının parametreleri incelendiğinde kapasitans değeri katkılamayla birlikte artmaktadır.

Tüm sonuçlar incelendiğinde bu tez çalışmasında ZnO'ya Cd katkısının ince filmlerdeki etkisi katkı oranı arttıkça kapasitif ve iletkenlik özelliklerini arttırdığı ve seri direnç etkisinin azaldığı görülmektedir. Üretilen ince filmleri birçok alanda elektriksel özellikleri bakımından kullanılabilir niteliktedir.

KAYNAKLAR

- Abdulrahman, A. F., Abd-Alghafour, N. M. and Ahmed, S. M. (2021). Optimization and characterization of SILAR synthesized ZnO nanorods for UV photodetector sensor. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 323, 112656.
- Ahmad, F. and Maqsood, A. (2021). Structural, electric modulus and complex impedance analysis of ZnO at low temperatures. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 273, 115431.
- Angelin, M. D., Rajkumar, S., Ravichandran, A. T. and Merlin, J. P. (2022). Systematic investigation on the electrochemical performance of Cd-doped ZnO as electrode material for energy storage devices. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 161(2021), 110486.
- Aydoğan, Ş. (2014). *Katıhal fiziği* (2.basım). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 9-32.
- Aydoğan, Ş. (2015). *Katıların elektronöği* (1.basım). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık, 15-50.
- Babar, U. D., Garad, N. M., Mohite, A. A., Babar, B. M., Shelke, H. D., Kamble, P. D. and Pawar, U. T. (2020). Study the photovoltaic performance of pure and cd-doped zno nanoparticles prepared by reflux method. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2780–2785.
- Bowen, D. K. and Tanner, B. K. (2006). *X-Ray metrology in semiconductor manufacturing. X-Ray Metrology in Semiconductor Manufacturing*, 24, 2437.
- Brinker, C. J. and Scherer, G. W. (1990). *Sol-gel science*, Academic Press INC, Boston: Elsevier, 20-34.
- Cesiulis, H., Tsyntsar, N., Ramanavicius, A. and Ragoisha, G. (2016). *Nanostructures and Thin Films for Multifunctional Applications*, Switzerland: Springer, 1-50
- Çorlu, T. (2017). *Zn1-XCuXO Kompleks Mos Sensörlerinde Sıcaklığa Bağlı Gaz Algılama Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 50.
- Díaz-Flores, L. L., Ramírez-Bon, R., Mendoza-Galván, A., Prokhorov, E. and González-Hernández, J. (2003). Impedance spectroscopy studies on SnO₂ films prepared by the sol-gel process. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 64(7), 1037–1042.
- Erbilen Tanrikulu, E., Altındal, Ş. and Azizian-Kalandaragh, Y. (2018). Preparation of (CuS–PVA) interlayer and the investigation their structural, morphological and optical properties and frequency dependent electrical characteristics of Au/(CuS–PVA)/n-Si (MPS) structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(14), 11801–11811.
- Gao, X. D., Li, X. M. and Yu, W. D. (2004). Deposition of polycrystalline ZnO thin films by successive ionic layer adsorption and reaction process (SILAR). *Journal of Inorganic Materials*, 19(3), 610–616.

- Ghosh, A., Kumari, N., Choudhury, S. P., Tewari, S. and Bhattacharjee, A. (2022). Enhanced blue-shift of the optical band gap in Cd-doped ZnO nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, 68(2) 1-20.
- Guzmán-Embús, D. A., Vargas-Charry, M. F. ve Vargas-Hernández, C. (2015). Optical and structural properties of ZnO and ZnO: Cd particles grown by the hydrothermal method. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(5), 1498–1505.
- Hench, L. L. and West, J. K. (1990). The sol-gel process. *Chemical Reviews*, 90(1), 33–72.
- Henini, M. (2000). Handbook of thin-film deposition processes and techniques. *Microelectronics Journal*, (31), 120-154.
- Hoffman, R. L., Norris, B. J. and Wager, J. F. (2003). ZnO-based transparent thin-film transistors. *Applied Physics Letters*, 82(5), 1–100.
- İnternet: Hu, C. (2009). Modern semiconductor devices for integrated circuits. *Recherche*, 384. Web: <http://www.lavoisier.fr/livre/notice.asp?id=OR2WYOASA3AOWE%5Cnh>
<http://www.eecs.berkeley.edu/~hu/Book- Chapters-and-Lecture-Slides>
<download.html%5Cnh>
<http://www.abhidiggs.com/Comps/semiconductor.pdf> Son Erişim Tarihi: 12.05.2022.
- Huang, K., Tang, Z., Zhang, L., Yu, J., Lv, J., Liu, X. and Liu, F. (2012). Preparation and characterization of Mg-doped ZnO thin films by sol-gel method. *Applied Surface Science*, 258(8), 3710–3713.
- Hummel, R. E. (1985). *Electronic Properties of Materials. Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents* (C. 3). Berlin: Springer, 67-98.
- Wilson J., and Hawkes, J. F. B. (2000). *Optoelektronik*. Adapazarı: Değişim Yayınları, 112-145.
- Jule, L. T., Dejene, F. B., Ali, A. G., Roro, K. T., Hegazy, A., Allam, N. K. and El Shenawy, E. (2016). Wide visible emission and narrowing band gap in Cd-doped ZnO nanopowders synthesized via sol-gel route. *Journal of Alloys and Compounds*, 687, 920–926.
- Karunakaran, C., Vijayabalan, A. and Manikandan, G. (2012). Photocatalytic and bactericidal activities of hydrothermally synthesized nanocrystalline Cd-doped ZnO. *Superlattices and Microstructures*, 51(3), 443–453.
- Kasik, I., Mrazek, J., Podrazky, O., Seidl, M., Aubrecht, J., Tobiska, P., Matejec, V., Kovacs, B., Markovics, A., and Vlckova, K. (2008). *Preparation and characterization of thin transducer layers sensitive to free chlorine in water*. *Materials Science and Engineering*, 28(5-6), 842-847.
- Kaur, D., Bharti, A., Sharma, T. ve Madhu, C. (2021). Dielectric properties of zno-based nanocomposites and their potential applications. *International Journal of Optics*, 2021, 1-20.

- Kayani, Z. N., Iram, S., Rafi, R., Riaz, S. and Naseem, S. (2018). Effect of Cu doping on the structural, magnetic and optical properties of ZnO thin films. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 124(7), 137–150.
- Kittel charles. (2014). *Katı hal fiziğine giriş*. Ankara: Palme Yayınları, 97-146.
- Klingshirn, C. F. (2007). ZnO: Material, physics and applications. *ChemPhysChem*, 8(6), 1–100.
- Kokate, S. K., Jagtap, C. V., Baviskar, P. K., Jadkar, S. R., Pathan, H. M. and Mohite, K. C. (2018). CdS sensitized cadmium doped ZnO solar cell: Fabrication and characterizations. *Optik*, 157, 628–634.
- Lee, K. M., Lai, C. W., Ngai, K. S., and Juan, J. C., Recent developments of zinc oxide based photocatalyst in water treatment technology: A review. *Water Research*, 88, 428–48, 2016.
- Li, G., Zhu, X., Tang, X., Song, W., Yang, Z., Dai, J., and Dai, S. (2011). Doping and annealing effects on ZnO: Cd thin films by sol-gel method. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(14), 4816–4823.
- Li, S. (2006). *Semiconductor physical electronics*. New york: Springer, 120-143.
- Lin, J. C., Huang, M. C., Wang, T. H., Wu, J. N., Tseng, Y. T. and Peng, K. C. (2015). Structure and characterization of the sputtered ZnO, Al-doped ZnO, Ti-doped ZnO and Ti, Al-co-doped ZnO thin films. *Materials Express*, 5(2), 153–158.
- Livage, J. (1997). Sol-gel processes. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2(2), 132–138.
- Lobo, L. S. and Ruban Kumar, A. (2019). Structural and electrical properties of ZnCo₂O₄ spinel synthesized by sol-gel combustion method. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 505(2018), 301–309.
- Locorotondo, E., Pugi, L., Berzi, L., Pierini, M., Scavuzzo, S., Ferraris, A., Carello, M. (2019). *Modeling and simulation of constant phase element for battery electrochemical impedance spectroscopy*. Proceedings of 5th International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Innovation to Shape the Future, RTSI 2019 - Proceedings, Firenze, Italy, 225–230.
- Look, D. C., Reynolds, D. C., Sizelove, J. R., Jones, R. L., Litton, C. W., Cantwell, G. and Harsch, W. C. (1998). Electrical properties of bulk ZnO. *Solid State Communications*, 105(6), 399–401.
- Mackenzie, J. D. (1988). Applications of the sol-gel process. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 100(1–3), 162–168.
- Mahmoud, W. E. ve Al-Sanoosi, A. M. (2012). Synthesis, characterization and photoluminescence of ZnO: Cd rosette-like nanostructures using solution process. *Superlattices and Microstructures*, 51(4), 506–511.

- Maiti, U. N., Ghosh, P. K., Ahmed, S. F., Mitra, M. K. ve Chattopadhyay, K. K. (2007). Structural, optical and photoelectron spectroscopic studies of nano/micro ZnO: Cd rods synthesized via sol-gel route. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 41(1), 87–92.
- Massalski, T. B., Klug, P., Palmer, R. A. and Stock, S. R. (2004). X-ray analysis of metallic materials. *Introduction and Cross*, 3–52.
- Mishra, U. K. and Singh, J. (2008). *Semiconductor device physics and design (3th edition)*. Netherlands: Springer, 78-90
- Neamen, D. A. (2006). *Semiconductor physics and devices (cilt 9)*. Newyork: The MCGraw-Hill 1-150.
- Nkhaili, L., Elyaagoubi, M., Elmansouri, A., El Kissani, A., El Khalfi, A., Elfathi, A., and Outzourhit, A. (2015). Structural, optical, and electrical characteristics of zinc oxide and copper oxide films and their heterojunctions. *Spectroscopy Letters*, 48(7), 536–541.
- Oruç, P., Turan, N., Demirölmez, Y., Seçkin, A., Cavdar, Ş., Koralay, H. and Tuğluoğlu, N. (2021). AC conductivity, dielectric and electrical modulus studies of bulk Zn_{0.95}Co_{0.05}O ceramic. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(12), 15837–15850.
- Ozgun, Ü., Alivov, Y. I., Liu, C., Teke, A., Reshchikov, M. A., Dogan, S., and Morko, H. (2005). A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of Applied Physics*, 98(4), 1–103.
- Pierre, A. C. (1998). *Introduction to sol-gel processing (cilt 1)*. Boston, MA: Springer US, 35-43.
- Piprek J. (2003). *Semiconductor optoelectronic devices: Semiconductor optoelectronic devices*, USA: Elsevier, 200.
- Podia, M. and Tripathi, A. K. (2022). Structural , optical and luminescence properties of ZnO thin films : Role of hot electrons defining the luminescence mechanisms. *Journal of Luminescence*, 252, 119331.
- Lowe, R. G., and Sareen, R. A. (2017). *Semiconductor and x-ray detectors (C. 4)*. New York: Crc Press, 1-100.
- Saxena, P., Choudhary, P., Yadav, A., Dewangan, B., Rai, V. N. and Mishra, A. (2020). Improved structural and dielectric properties of Cd and Ti dual doped ZnO nanoparticles. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 126(10), 1–11.
- Schmid, S., Hausbrand, R. and Jaegermann, W. (2014). Cobalt oxide thin film low pressure metal-organic chemical vapor deposition. *Thin Solid Films*, 567, 8–13.
- Seçkin, A., Koralay, H., Cavdar, S., Turan, N. and Tuğluoğlu, N. (2022). Impedance Spectroscopy and Structural Characterization of Nanostructured ZnO and Hf-Doped ZnO Ceramics. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 11(8), 083014.

- İnternet: Seeger, K. (2004). *Semiconductor Physics Advanced Texts in Physics Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH*. New York. Web: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-09855-4>, Son Erişim Tarihi: 22.04.2022.
- Serway, R. A. ve Beichner, R. J. (2011). *Physics for scientists and engineers with modern physics*. Ankara: Palme Yayınları, 140-168.
- Shaislamov, U., Krishnamoorthy, K., Kim, S. J., Choi, S., Chun, W. and Lee, H. J. (2016). Growth of CuO/ZnO nanobranched photoelectrode with enhanced stability for solar hydrogen generation. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(10), 10541–10547.
- Singh, J. (2003). *Electronic and optoelectronic properties of semiconductor structures*. Cambrige: News.Ge, 85-110
- Tiss, B., Moualhi, Y., Bouguila, N., Kraini, M., Alaya, S., Croitoru, C., and Cunha, L. (2021). Influence of the physical properties on the antibacterial and photocatalytic behavior of ag-doped indium sulfide film deposited by spray pyrolysis. *Coatings*, 11(4), 370.
- Tobergte, D. R. ve Curtis, S. (2013). *Springer series in surface sciences. Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689-1699.
- Turan, N., Oruç, P., Demirölmez, Y., Seçkin, A., Çağırtekin, A. O., Cavdar, S., Tuğluoğlu, N. (2021). Investigation of temperature dependent electrical and impedance characteristics of bulk Zn_{0.95}Co_{0.05}O. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 100(1), 147–159.
- Wasa, K., Kitabatake, M. and Adachi, H. (2016). *Thin film materials technology*. New York: Willam Andrew, 45-98.
- Yewale, R., Damlin, P., Suominen, M. ve Kvarnström, C. (2022). Fabrication of electroactive multi-layered polyazulene thin films by atmospheric pressure-vapor phase polymerization. *Materials Chemistry and Physics*, 275, 125292.
- Zor, M. (1982). *Spray-pyrolysis ile elde edilen AgInS₂ bileşiğinin bazı fiziksel özellikleri*. Yayımlanmış Doçentlik Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 66.



Gazili olmak ayrıcalıktır