

**Fe/PZT VE Co/PZT İNCE FİMLERİNİN DİELEKTRİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

AHMET DEMİRKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ ALİYE KAHYAOĞLU

DÜZCE, 2024



DÜZCE
ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**Fe/PZT VE Co/PZT İNCE FİLMLEİNİN DİELEKTRİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

AHMET DEMİRKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ ALİYE KAHYAOĞLU

DÜZCE, 2024

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Fe/PZT VE Co/PZT İNCE FİLMLEİNİN DİELEKTRİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ahmet DEMİRKAYA tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Aliye KAHYAOĞLU

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Aliye KAHYAOĞLU

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Oğuz KÖYSAL

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet DEMİR

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 22/01/2024

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

22 Ocak 2024

Ahmet DEMİRKAYA



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Aliye KAHYAOĞLU'na en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

22 Ocak 2024

Ahmet DEMİRKAYA

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
ÇİZELGE LİSTESİ.....	VIII
KISALTMALAR.....	IX
SİMGELER	X
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİ	4
2.1. MULTİFERROİK MALZEMELER.....	4
2.1.1. Ferromanyetik Malzemeler	5
2.1.2. Ferroelektrik Malzemeler	9
2.2. DİELEKTRİK MALZEMELER	10
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	15
3.1. PBZRTIO ₃ (PZT) ÖZELLİKLERİ	15
3.2. DEMİR VE KOBALT ELEMENTLERİNİN ÖZELLİKLERİ.....	16
3.3. VAKUM BUHARLAŞTIRMA TEKNİĞİ	17
3.4. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM).....	18
3.5. EMPEDANS SPEKTROSKOPİSİ.....	21
3.6. ÇALIŞMANIN AMACI	21
4. DENEYSEL BULGULAR.....	22
4.1. SEM SONUÇLARI.....	22
4.2. EMPEDANS SPEKTROSKOPİ SONUÇLARI	23
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	28
6. KAYNAKÇA	30
ÖZGEÇMİŞ	34

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Ferromanyetik bir maddeye dış manyetik alan uygulanmadığında oluşan manyetik dizilim.....	7
Şekil 2.2. Ferromanyetik bir maddeye dış manyetik alan uygulandığında oluşan manyetik dizilim.....	7
Şekil 2.3. Ferromanyetik malzemenin, mıknatıslanma(M) ve dış manyetik alan(H) eğrisi.	8
Şekil 2.4. Manyetik Histerisiz Eğrisi (B: Mıknatıslanma, H: Uygulanan Alan).	9
Şekil 2.5. Ferroelektrik histerisiz döngüsü [11].....	10
Şekil 2.6. Tek durulma zamanlı dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımlarının Cole-Cole eğrileri [14].	14
Şekil 3.1. Perovskit yapıdaki PZT kristali [25].	15
Şekil 3.2. Paramanyetik ve ferromanyetik metallerin durum yoğunluğu [28].	17
Şekil 3.3. Termal Vakum Buharlaştırma düzeneği [30].	18
Şekil 3.4. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) şematik gösterimi [33].	20
Şekil 4.1. Hazırlanan ince filmlerin temsili gösterimi.	22
Şekil 4.2. Fe/PZT ince filmlerin SEM görüntüleri.	23
Şekil 4.3. Co/PZT ince filmlerin SEM görüntüleri.	23
Şekil 4.4. Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerinin dielektrik sabitinin reel kısmı (ϵ')- frekans bağımlılığı.	24
Şekil 4.5. Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerinin dielektrik sabitinin sanal kısmı (ϵ'')- frekans bağımlılığı.	25
Şekil 4.6. Saf PZT, Co kaplı PZT ve Fe kaplı PZT ince filmlerin tanjant kayıp faktör ($\tan\delta$)-frekans grafiği.	26
Şekil 4.7. Saf PZT, Co kaplı PZT ve Fe kaplı PZT ince filmlerin dielektrik sabitin sanal kısmı (ϵ'')- dielektrik sabitinin reel kısmı (ϵ') grafiği (cole-cole diyagramı).	27

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 4.1. Hazırlanan ince filmlerin görece düşük frekansta ϵ' değerleri.....	25
Çizelge 4.2. Hazırlanan ince filmlerin kritik frekansta ϵ'' değerleri.	26

KISALTMALAR

BTO	BaTiO ₃
EPR	Elektron Paramanyetik Rezonans
FMR	Ferromanyetik Rezonans
GMR	Giant Magneto-Resistance
LCR metre	Bobin(L) Kondansatör(C) Direnç(R) Ölçüm Cihazı
ME	Manyetoelektrik
MRAM	Manyetik Bellek
PPMS	Physical Properties Measurement System
PZT	Kurşun Zirkonat Titanat
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TMR	Tunneling Magneto-Resistance
VSM	Vibrating Sample Magnetometer
XPS	X-ışınları Fotoelektron Spektroskopisi

SİMGELER

Ba	Baryum
Bi	Bizmut
C	Karbon
Co	Kobalt
Cr	Krom
Dy	Disprosyum
Fe	Demir
Ge	Germanyum
Gd	Godolinyum
H	Hidrojen
Hc	Yüksek Akım
Ho	Holmiyum
Hp	Yüksek Potansiyel
K	Potasyum
La	Lantan
Lc	Düşük Akım
Lp	Düşük Potansiyel
μ	Dipol Moment
Mn	Manganez
Na	Sodyum
Nb	Niyobyum
Ni	Nikel
O	Oksijen
O ₃	Ozon Gazı
P	Fosfor
Pb	Kurşun
Se	Selenyum
Sr	Stronsiyum
Tb	Terbiyum
Ti	Titanyum
Zn	Çinko
Zr	Zirkonat
Ω	Ohm

ÖZET

FE/PZT VE CO/PZT İNCE FİMLERİNİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ahmet DEMİRKAYA

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Aliye KAHYAOĞLU

Ocak 2024, 33 sayfa

Ferroelektrik özelliklere sahip $\text{PbZr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$ seramik malzemesi elektriksel ve elektromekaniksel özelliklerinden dolayı araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir. Bu çalışmada, Ferroelektrik $\text{PbZr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$ (PZT) seramik malzemesi üzerine vakum buharlaştırma tekniği ile ferromanyetik özelliklere sahip Fe ve Co malzemeleri ayrı ayrı kaplanmıştır. Hazırlanmış ince filmlerin dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları, kayıp tanjantı, cole-cole diyagramı gibi dielektrik özelliklerin frekansla değişimi incelenmiştir. Saf PZT, Fe kaplı PZT ve Co kaplı PZT ince filmlerin dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları, kayıp tanjantı, cole-cole diyagramı oda sıcaklığında frekansın bir fonksiyonu olarak yüksek frekans (1 MHz – 3 GHz) aralığında empedans analizörü ile ölçülmüştür.

Anahtar sözcükler: Dielektrik, Multiferroik, PZT

ABSTRACT

INVESTIGATION OF DIELECTRIC PROPERTIES OF FE/PZT AND CO/PZT THIN FILMS

Ahmet DEMIRKAYA

Düzce University

Institute of Postgraduate Education, Department of Physics

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Aliye KAHYAOĞLU

January 2024, 33 pages

$\text{PbZr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$ ceramic material, which has ferroelectric properties, attracts great attention from researchers due to its electrical and electromechanical properties. In this study, Fe and Co materials with ferromagnetic properties were coated separately on the ferroelectric $\text{PbZr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$ (PZT) ceramic material by vacuum evaporation technique. The variation of dielectric properties such as the real and imaginary parts of dielectric constant, loss tangent, cole-cole diagram of the prepared thin films with frequency was examined. The real and imaginary parts of dielectric constant, loss tangent, cole-cole diagram of pure PZT, Fe-coated PZT and Co-coated PZT thin films were measured with an impedance analyzer as a function of frequency in the range of high frequency (1 MHz – 3 GHz) at room temperature.

Keywords: Dielectric, Multiferroics, PZT

1. GİRİŞ

Multiferroik, hem manyetik hem de ferroelektrik özelliklere sahip olan bir malzeme veya malzeme sınıfını ifade eder. Manyetik özellikler, malzemenin bir manyetik alan altında davranışını belirlerken, ferroelektrik özellikler, malzemenin elektrik alan altında davranışını belirtir. Geleneksel olarak, çoğu malzeme bu özelliklerden sadece birine sahip iken multiferroik malzemeler hem manyetik hem de ferroelektrik özelliklere sahip oldukları için özel ve ilgi çekicidir. Bu tür malzemelerde, manyetizasyon (manyetik özellik) ile polarizasyon (elektrik özellik) arasında bir ilişki bulunabilir. Yani, bir manyetik alan uygulandığında elektriksel bir polarizasyon elde edilebilir veya tersi durumda bir elektrik alanı uygulandığında bir manyetik alan ortaya çıkabilir. İki farklı özelliğe sahip olmaları, çeşitli alanlarda kullanımlarını mümkün kılar ve bazı potansiyel uygulama alanları şunlardır:

- Veri Depolama Teknolojileri: Multiferroik malzemeler, manyetik alanların elektrik alanlarıyla kontrol edilebildiği manyetoelektrik etkileri sayesinde bilgi depolama alanında kullanılabilirler. Bu, daha hızlı ve daha enerji verimli veri depolama teknolojilerinin geliştirilmesine olanak sağlar.
- Sensör Teknolojileri: Multiferroik malzemeler, manyetik alanlara ve elektriksel alanlara duyarlılık gösterdikleri için hassas sensörlerin yapımında kullanılabilirler. Bu sensörler, manyetik alan değişikliklerini veya elektriksel sinyalleri algılamak için kullanılabilir.
- Enerji Dönüşümü: Multiferroik malzemeler, manyetoelektrik etkileri sayesinde enerji dönüşümü uygulamalarında da potansiyele sahiptirler. Manyetik alan enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme veya tersi işlemi gerçekleştirme yetenekleri, enerji üretimi ve dönüşümü alanında yeni fırsatlar sunabilir.
- Spintronik: Spintronik, elektronların sadece yükleri değil, aynı zamanda spinleri üzerine odaklanan elektronik bir alandır. Multiferroik malzemeler, manyetik ve elektriksel alanların spintronik cihazlarında kontrol edilmesine olanak tanır, bu da daha gelişmiş ve verimli elektronik cihazların oluşturulmasına yardımcı

olabilir.

- Manyetik Bellek ve Sensörler: Manyetik alanların ferroelektrik özelliklerle kontrol edilebildiği multiferroik malzemeler, veri depolama için yeni nesil bellek cihazlarının geliştirilmesinde kullanılabilir. Ayrıca, hassas manyetik sensörlerin yapımında da kullanımları potansiyeldir.

Bu alanlar, multiferroik malzemelerin kullanımı için örnek oluşturur; ancak bu malzemelerin uygulamaları hala araştırma ve geliştirme aşamasındadır ve endüstriyel ölçekte kullanımları için daha fazla çalışma gerektirmektedir. Bu amaçla hem literatüre hem de endüstriyel alana katkı sağlama düşüncesiyle bu çalışmada vakum buharlaştırma yöntemiyle multiferroik film elde edilmesi hedeflenmiştir. Tezin 2. Bölümünde çalışma ile ilgili teorik bilgilere yer verilmiştir. Özellikle multiferroik ve dielektrik hakkında durulmuştur. 3. Bölümde deneyde kullanacağımız malzemeler ile ilgili bilgiler yer almaktadır. Daha sonrasında kaplama yöntemleri ve analiz yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonraki bölümde, hazırlanan ince filmlerin ölçüm sonuçları sonunda elde edilen analizleri tartışılmıştır. Bu tez çalışmasında ferroelektrik $PbZr_{0,5}Ti_{0,5}O_3$ (PZT) seramik malzemesi üzerine vakum buharlaştırma tekniği ile ferromanyetik özelliklere sahip Fe ve Co malzemeleri ayrı ayrı kaplanmıştır. Hazırlanmış ince filmlerin morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları, kayıp tanjantı, cole-cole diyagram gibi dielektrik özelliklerin frekansla birlikte değişimi tetkik edilmiştir. Saf PZT, Fe kaplı PZT ve Co kaplı PZT ince filmlerin dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları, kayıp tanjantı, cole-cole diyagramı oda sıcaklığında frekansın bir fonksiyonu olarak (1 MHz ile 3 GHz aralığında) empedans analizörü ile ölçülmüştür. Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerin dielektrik sabitinin reel kısmının, artan frekansla azaldığı gözlemlenmiştir. Dielektrik polarizasyondan dolayı nispeten düşük frekans alanında dielektrik sabitinin reel kısmı daha yüksek iken, yüksek frekans alanında dielektrik sabitinin reel kısmının azaldığı gözlemlenmiştir. Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerin dielektrik sabitin sanal kısmı değerinin artan frekansla önce arttığı, daha sonra parabolik olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Düşük frekans bölgesinde Co/PZT ve Fe/PZT örneklerinin dielektrik sabitin sanal kısmı benzer değerlere sahipken, saf PZT örneğinin dielektrik sabitin sanal kısmı daha düşük bir değere sahiptir. Cole-cole grafiği tüm ince filmlerde tek bir gevşemenin olduğunu ve bunun bir RC devresine karşılık geldiğini göstermektedir. Tüm sonuçlar ışığında, Fe/PZT ince filmin yüksek frekans bölgesinde daha iyi

dielektrik özellikler gösterdiğini söylemek mümkündür.



2. TEORİK BİLGİ

Malzeme, bir nesneyi veya ürünü oluşturan herhangi bir madde veya bileşendir. Malzeme; etrafımızda gördüğümüz, kullandığımız ve bir şey olabilecek potansiyele sahip her şeydir. Malzeme, genellikle bir amaç doğrultusunda kullanılan ve belirli özelliklere sahip olan hammaddelerdir. İnşaat, imalat, endüstri, teknoloji ve bilim gibi birçok alanda kullanılan malzemeler, çeşitli özelliklere sahiptir. Malzemeler, kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olabilir. Örneğin, metaller mükemmel iletkenlik sağlayabilirken, seramikler yüksek sıcaklık dayanımına sahip olabilir. Plastikler esneklik ve hafiflik sunarken, camlar şeffaflık ve dayanıklılık sağlar. Malzemeler, doğal kaynaklardan elde edilebildiği gibi yapay olarak da üretilebilir. Malzemeler, kullanılacakları alanlara göre özelliklerini optimize etmek için özel olarak tasarlanabilir veya değiştirilebilir. Bu da yeni malzemelerin keşfine ve geliştirilmesine yol açar [1].

Makro ölçekteki malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri, nano ölçekte hazırlanan aynı malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden büyük farklılıklar göstermektedir. Aslında makro boyutlarda iletken olan bir malzeme, nano boyutlara indirildiğinde yalıtkan hale gelebilmektedir. Nanometre seviyesindeki malzemelerin kuantum boyut etkisi olarak bilinen yeni özellikler göstermesi bu konuda yapılan araştırmaların artmasına neden olmuştur. Bu sayede bilgi depolama, bilgisayarlardaki manyetik okuma ve yazma kafaları, manyetik sensörler, manyetik bellek, tek elektron tabanlı kuantum bilgi işleme cihazları, mikrodalga elektronik cihazlar gibi çok çeşitli alanlarda teknolojik uygulamalar için potansiyel yaratmaktadır [1], [2].

2.1. MULTİFERROİK MALZEMELER

Birden fazla “ferro” özelliğe (ferroelektrik, ferromanyetik, ferroelastik gibi) sahip malzemelere multiferroik malzeme denir. En bilinen örnekleri arasında $TbMnO_3$, $HoMn_2O_5$, $BiFeO_3$, $BiMnO_3$, $BaNiF_4$, $ZnCr_2Se_4$ sayılabilir. Bu malzemeler, belli şartlar altında farklı ferroik özellikleri aynı anda gösterirler [3], [4], [5].

Multiferroik malzemelerin özelliklerden biride elektrik polarizasyonudur. Katı

malzemeleri oluşturan atomlar öteleme hareketi yapamazlar, mevcut konumlarının etrafında titreşirler. Ancak elektronlar tamamen bir atoma bağlı değildir. Elektronların hareketi sebebiyle toplamda malzeme yüksüz olsa dahi, malzemenin bazı bölümleri pozitif bazı bölümleri ise negatif yüklenererek elektriksel polarizasyon meydana getirirler [3]. Ferroelektrik malzemeler elektriksel alan uygulanmadan kendiliğinden kutuplaşmaya, ferromanyetik malzemeler ise manyetik alan olmadan kendiliğinden mıknatıslanmaya sahip malzemelerdir. Bu maddelerin manyetik ve dielektrik uygunluklarının diğer malzemelere göre çok yüksek olması ve dış etkenlere karşı lineer olmayan tepki sergilemeleri, bu malzemeleri uygulama açısından cazip hale getirmektedir [2].

2.1.1. Ferromanyetik Malzemeler

Manyetizma temelde elektronların yörüngesel ve spin hareketleri ile elektronların birbirleriyle olan etkileşimiyle ilgilidir. Farklı manyetizma özelliklerini görmenin en iyi yolu malzemelerin manyetik alana karşı verdiği tepkilere bakmaktır. Aslında bütün maddeler manyetik özellik gösterir ancak maddelerin gösterdiği manyetik özellikler birbirinden farklıdır. \vec{M} mıknatıslanma vektörüdür ve mıknatıslanma ($M = \frac{\mu}{V}$) birim hacimdeki manyetik momente karşılık gelmektedir. \vec{H} : Uygulanan manyetik alan ve χ : manyetik uygunluk (uygulanan manyetik alana, malzemenin verdiği cevap) olmak üzere [6]:

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir.

χ pozitif ise madde paramanyetik, \vec{M} ile \vec{H} aynı yönlüdür.

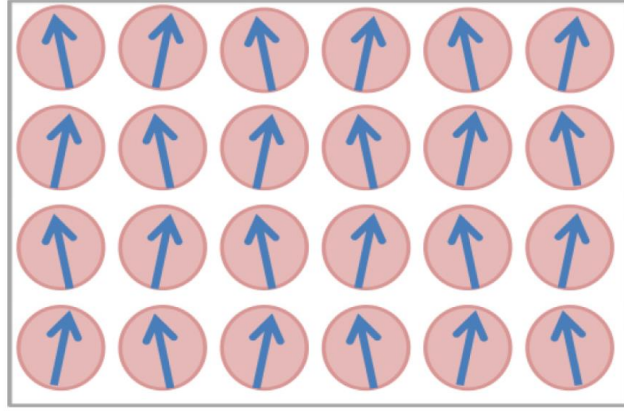
χ negatif ise madde diamanyetik, \vec{M} ile \vec{H} zıt yönlüdür.

Ferromanyetik malzemeler için bu şekilde bir lineer bağımlılık söz konusu değildir.

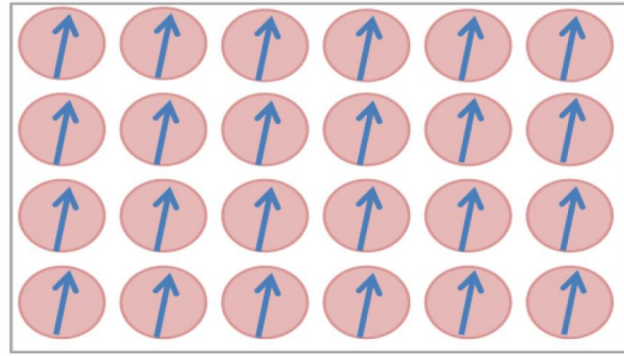
Diamanyetik Madde: Manyetik alan içerisinde zıt yönde ve zayıf olarak mıknatıslanan maddeler iken, Paramanyetik Madde: Manyetik alan içerisinde aynı yönde ve zayıf olarak mıknatıslanan maddelerdir [7], [8], [9].

Ferromanyetik malzemeler (ferromıknatıslar) en güçlü mıknatıslardır ve günlük hayatımızda kullandığımız mıknatısların aşığı yukarı hepsi bu malzemelerden üretilmiştir. Bu malzemeler kendiliğinden yönelmiş manyetik momentlere sahiplerdir. Element halinde bulunan kalıcı mıknatıslar tabiatta son derece azdır (Fe, Ni ve Co). Bu elementleri içeren bileşiklerin çoğunluğu ferromanyetik özellik göstermektedir. Ayrıca, kısmen yeni bir tür olarak, güçlü ve kalıcı bir mıknatıs olan nadir toprak mıknatısları da son yıllarda ön planda olmaktadır. Lantanit bileşikleri olarak ta bilinen bu nadir toprak bileşikleri, d orbitallerindeki güçlü manyetik momentleri sebebiyle güçlü ferromanyetik özellik gösterirler [10].

Ferromanyetik maddeler olan Demir (Fe), Nikel (Ni), Gadolinyum (Gd) ve Disprosyum (Dy) kuvvetli manyetik maddelerdir. Bu ferromanyetik maddeler mıknatıs yapımında kullanılırlar. Bu maddeler zayıf dış manyetik alan içerisinde kendi içinde dahi birbirlerine paralel yönelmeye çalışan atomik manyetik dipol momente sahiptirler. Momentler paralel olduktan sonra dış manyetik alan kaldırılrsa dahi madde mıknatıslanmış olarak kalmaya devam edecektir. Bu şekilde devam etmesinin sebebi komşu manyetik momentler arasında olan kuvvetli etkileşimden dolayıdır. Ferromanyetik malzemelerde her atom net manyetik momente sahiptirler ve bu atomların manyetik momentleri birbirleriyle etkileşim halindedir. Bundan dolayı da manyetik momentlerin hepsi birbirleriyle aynı yönde ve paraleldirler. Bu etkileşim olayına ilk defa Weiss tarafından “moleküler alan teorisi” denmiştir ve bu teoriye göre, manyetik momentlerin hepsi aynı yönde ve paralel olması sebebiyle mıknatıslanmada daha fazla artış gerçekleşmez dolayısıyla ferromıknatıslar manyetik alan altında doyum mıknatıslanmasına ulaşırlar. Ferromanyetizmanın Heisenberg modelinde kuantum mekaniksel olarak, manyetik momentlerin paralel şekilde oluşması, komşu manyetik momentler arasındaki değış-tokuş etkileşimi sebebiyledir. Ferromanyetik bir maddeye, dış manyetik alan uygulanmadığında ve uygulandığında oluşan manyetik dizilim Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

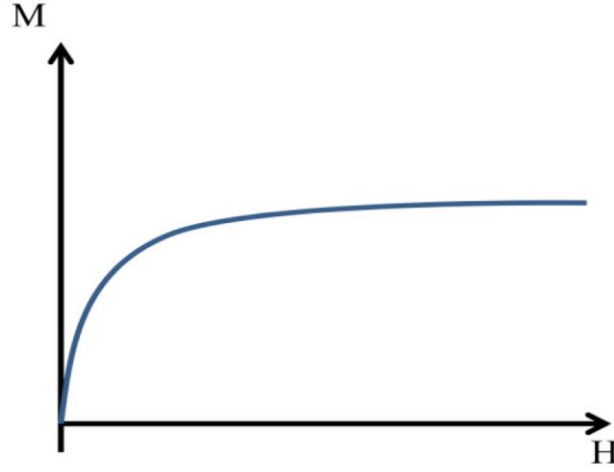


Şekil 2.1. Ferromanyetik bir maddeye dış manyetik alan uygulanmadığında oluşan manyetik dizilim.



Şekil 2.2. Ferromanyetik bir maddeye dış manyetik alan uygulandığında oluşan manyetik dizilim.

Ferromanyetik bir maddeye dış manyetik alan (H) uygulandığında, manyetizasyon (M) yani mıknatıslanma artarak malzeme içerisindeki atomlar düzenlenmeye başlar. Mıknatıslanma artırılmaya devam ettikçe bir süre sonra malzemedeki atomların hepsi artık düzenlenmiş olduğu için mıknatıslanma nihai olarak doyuma ulaşır ve sabitlenir. Bu durum Şekil 2.3'te şematik olarak gösterilmiştir.

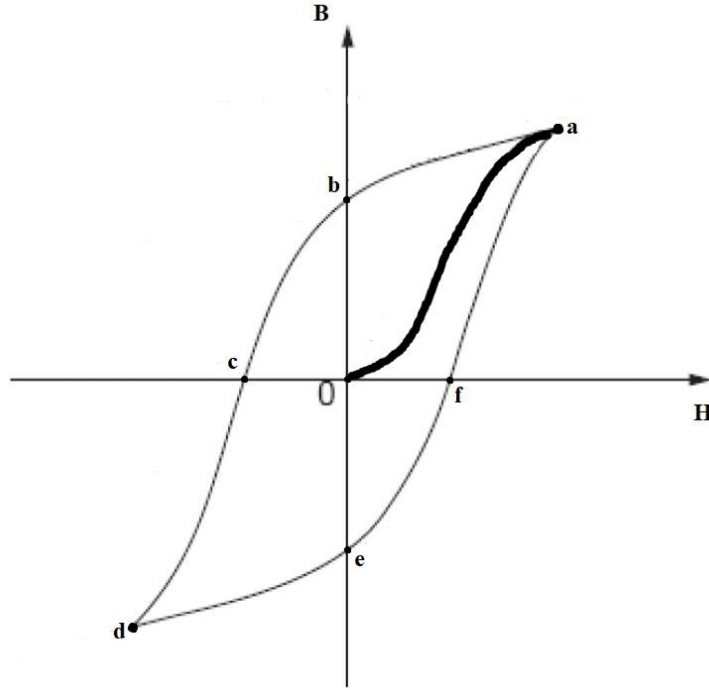


Şekil 2.3. Ferromanyetik malzemenin, mıknatıslanma(M) ve dış manyetik alan(H) eğrisi.

Malzeme içinde bulunan manyetik bölgelerde (domainlerde) olan manyetik momentlerin hepsinin paralel ve aynı yönde olduğunu Weiss moleküler alan teorisinde bahsetmiştir. Dış manyetik alan uygulandığında malzemenin davranış biçimini malzemede bulunan bu manyetik bölgeler belirler. Ferromanyetik malzemeler genellikle doyum mıknatıslanmasına göre karşılaştırılıp sınıflandırılırlar [8].

Manyetik bölge özelliğinden dolayı uygulanan dış manyetik alan ve dolayısıyla manyetizmadaki değişim, manyetik momente sahip olan Ferromanyetik-Ferrimanyetik malzemelerde çizgisel olmayan bir eğri meydana getirir. Şekil 2.4'te bu durum gösterilmiştir. Bu grafik manyetik malzemenin manyetik sertlik ve yumuşaklık durumunu, mıknatıslanmanın doyum, kalıcı ve zorlayıcı alan değeri gibi parametreler hakkında bilgi verir. 0 (sıfır) noktasında manyetik bölgeler rastgele ve düzensiz olarak yönelmişlerdir. Dış alan arttıkça bölgeler daha çok paralel olur ve a noktasında ise yaklaşık hepsi paralel olurlar. Burası malzemenin doyum noktasıdır. Doyum noktası ise bir malzemenin alabileceği en büyük mıknatıslanma değeridir ve bütün bölgelerin aynı yöneldikleri durumu gösterir. Bundan sonra dış alan azaltılırsa eğri ab yolunu takip eder ve b noktasında uygulanan dış alan 0 (sıfır) olmasına rağmen madde hâlihazırda mıknatıslanmış olduğundan dolayı artık kalıcı mıknatıslanma gerçekleşmiştir. Dış alanın yönü değiştirilir ve şiddeti artırılırsa malzeme tekrar mıknatıslanmamış duruma yani c noktasına gelene kadar bölgeler yön değiştirir. C noktasında ise malzemenin artık mıknatıslanma söz konusu olmaz. Dolayısıyla dışarıdan uygulanan manyetik alan etkisiyle mıknatıslanma 0 (sıfır) olur. Bu değere zorlayıcı alan denir ve bu değer bize

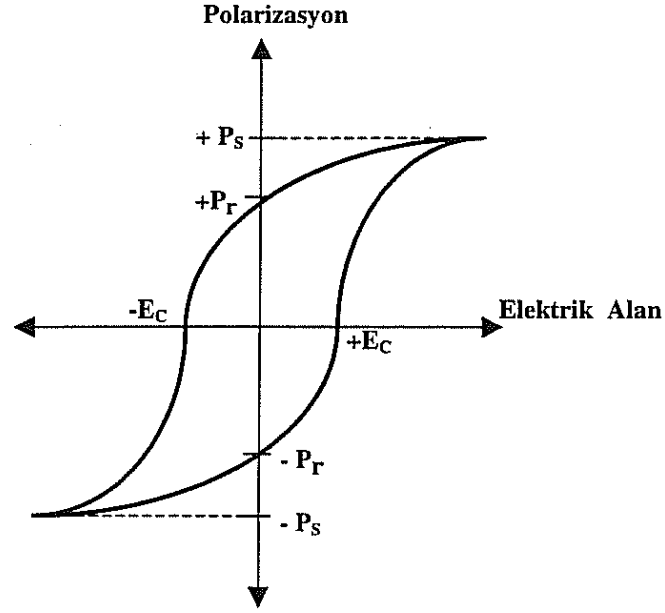
malzemenin mıknatıslanmasının ne kadar kolay veya zor olacağı hakkında bilgi verir. Son olarak ta dış alan ters olarak uygulanırsa malzeme bu sefer ters yönde mıknatıslanır ve bu sefer d noktasında doyuma ulaşır ve dış alan başlangıçta olduğu gibi aynı yönde artırılırsa benzer olaylar silsilesi tekrar eder, mıknatıslanma eğrisi d-e-f yolunu izlemeye devam eder. Dış alan artırılmaya devam ederse eğri başladığı noktaya geri dönerek a noktasına geri gelir yani mıknatıslanma tekrar doyum noktasına ulaşmış olur.



Şekil 2.4. Manyetik Histerisiz Eğrisi (B: Mıknatıslanma, H: Uygulanan Alan).

2.1.2. Ferroelektrik Malzemeler

Ferroelektrik malzemeler, dış elektrik alan olmadığında bile kendiliğinden oluşan bir polarizasyona yani elektriksel dipol momente sahiptir. Ters elektrik alan uygulandığında malzemedeki polarizasyon ters yöne çevrilebilir. Belirli bir sıcaklık altında (T_c), elektriksel dipol momentin elektrik alana karşı grafiği çizildiğinde bir histerisiz eğrisi oluşur. Histerisiz eğrisinde E_c : koersiv alan noktası, P_r : kalıcı polarizasyon noktası ve P_s : doyma polarizasyon noktası olmak üzere üç önemli nokta bulunmaktadır [2], [11].



Şekil 2.5. Ferroelektrik histerisiz döngüsü [11].

Malzemeye maksimum elektrik alan uygulandığında veya ortadan kaldırıldığında, bu elektrik alandan dolayı oluşan polarizasyon ortadan kalkmadığı gibi bir miktar kalıcı polarizasyonu da (P_r) geride bırakır. Bu kalıcı polarizasyonu ortadan kaldırmak için önceden uygulanan elektrik alan değerinin tersi yönünde zorlayıcı elektrik alan (E_c) uygulanması gerekmektedir. Kısaca kritik elektrik alan yani zorlayıcı elektrik alan, yönlendirilmiş polarizasyonu sıfırlar yani ortadan kaldırır. (Şekil 2.5)

Histerisiz grafiğinin doğrusal kısmından, lineer bir çizgiyle sıfırı (0) gösterdiğinde, eğrinin polarizasyon eksenini kestiği nokta kendiliğinden polarizasyonu (P_s) verir. Elektrik alanın sıfır (0) olduğu noktada, histerisiz eğrisinin polarizasyon eksenini kestiği nokta ise kalıcı polarizasyonu (P_r) verir. P_s ile P_r noktaları arasındaki ölçülen polarizasyon değerleri, elektrik alan ile oluşturulmuş dielektrik polarizasyon değerini vermektedir [12].

Histerisiz döngüsünde kaplanan alan, bir yönden diğer yöne polarizasyonun kayması için gerekli enerjiyi temsil eder. Kalıcı polarizasyonun olması bilgisayar devrelerinde bilgi saklanması için malzemeyi kullanışlı hale getiren bir özelliktir.

2.2. DİELEKTRİK MALZEMELER

Dış elektrik alan uygulandığında net olarak elektriksel yük akışı olmayan, bunun yerine

yüklerin yer değiştirerek polarize olma özelliğine sahip, yük ve enerjinin depolanabildiği malzemelere dielektrik malzeme denir. Dielektrik malzeme, elektrik akımını iletebilecek serbest elektronları olmayan, yani elektrik yüklerini iletmeyen, elektrik alanıyla kutuplanma özelliği taşıyan, hiç elektrik iletkenliği olmayan veya çok zayıf elektrik iletkenliği olan malzemedir. Elektrik alanı içinde bulunduğu, polarizasyon oluşturarak elektrik alanı içinde bir enerji depolar. Bu malzemelerin kendi başlarına iletken olmadıkları, ancak elektrik alanı altında polarize oldukları bilinmektedir. Dielektrik malzemeler elektriği iletmezler ancak, elektrik alandan etkilenirler. Uygulanan elektrik alan etkisiyle malzemedeki yük merkezleri kayar ve uygulanan alana uygun olarak yönlendirilir. Bunun sonucunda malzemedeki oluşan dipoller, malzemedeki elektriksel yük depolanmasına olanak sağlar [13].

Dielektrik malzemeler deneysel olarak elde edilebilen boyutsuz bir büyüklüğe sahiptir, dielektrik sabit olarak karakterize edilir ve ϵ_r sembolü ile gösterilir. Elektrik alanın varlığında oluşan dipol etkileşimleri bu malzemelerin kondansatör üretimine elverişli olmasını sağlayan yüzey tabakalarındaki elektriksel yüklerin birikmesini mümkün kılar. Kondansatöre bir dış gerilim uygulandığında, plakalardan biri negatif diğeri pozitif elektriksel yüklerle yüklenmiş olur. İki plaka arasındaki elektrik alan pozitiften negatife doğru yönelir. Kapasitans (C), her iki plakada da depolanan yük miktarı ile ilgili olup, kapasitansın değeri

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.2)$$

şeklinde hesaplanır. Burada V, kondansatöre uygulanan potansiyel farkı, Q ise kondansatörün levhalarından birinde depolanan yüküdür. Eğer ki bir düzlem kapasitör inceliyorsak ve levhalar arasında boşluk var ise kapasitans;

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{l} \quad (2.3)$$

formülü ile hesaplanır [7]. ϵ_0 vakumun geçirgenliği olarak ifade edilir ve evrensel bir sabit olup, değeri $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ 'dir. A, levhalardan birinin yüzey alanı; l levhalar arası mesafedir. Eğer ki levhalar arasına, levhaların yük depolama kapasitesini artırmak amacıyla bir dielektrik malzeme konulursa bu durumda kapasitans değeri,

$$C = \varepsilon \frac{A}{l} \quad (2.4)$$

formülüyle hesaplanır. Burada ε dielektrik ortamın geçirgenliği gösterir ve bu, vakumun geçirgenliğinden büyüktür. Genellikle dielektrik sabitinin reel kısmı olarak isimlendirilen göreceli geçirgenlik ise

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (2.5)$$

formülüyle verilir ve dielektrik ortamın geçirgenliğinin, vakumun geçirgenliğine oranına eşittir [14].

Dielektrik malzemelerin en iyi karakterize eden olgusu, dielektrik sabitinin reel kısmının frekans bağımlılığıdır ve bu, bu malzemelerin teknolojideki uygulamaları için oldukça önemlidir. Tipik olarak, dielektrik malzemelere dış bir elektrik alan veya gerilim uygulandığında akım zamanla yön değiştirir, yani alternatif akımdır (AC). Alternatif akım (AC) elektrik alanına maruz kalmış bir dielektrik malzeme düşünüldüğünde, belirli bir süre içinde oluşan dipoller, harici alana bağlı olarak her yönde yeniden hizalanmaya çalışır. Farklı polarizasyon tipleri için, dipollerin alanın yönüne bağlı olarak yeniden hizalanma kabiliyetine göre minimum ve maksimum hizalanma süreleri farklılık gösterebilir [13].

Dielektrik özelliklerin incelenmesinde faydalanılan en temel ve en önemli durum kapasitans ve kayıp faktörü değerlerinin ölçülmesidir. Ölçülen kapasitans ve kayıp faktörü değerlerinden faydalanılarak, normalde karmaşık olan dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımlarının değerleri tespit edilir. Elektrik enerjisinin depo edilebilme özelliğini gösteren kapasitans ifadesini dielektrik sabitin reel kısmına bağlayan denklem aşağıdaki gibi ifade edilir [15], [16], [17].

$$\varepsilon' = \frac{Cd}{\varepsilon_0 A} \quad (2.6)$$

d: malzemenin kalınlığı, A: malzemenin alanı

Dielektrik malzemelerin en temel özellikleri, karmaşık dielektrik sabiti (ε^*) ile gösterilir. Uygulanan dış elektrik alan etkisinde olan dielektrik malzemenin içerisinde ne kadar enerji depolandığını dielektrik sabitin reel kısmı (ε'), malzemelerde meydana

gelen enerji kaybının ne kadar olduğunu ise dielektrik sabitinin sanal kısmı (ε'') ortaya koyar. Bu durum Denklem (2.7)'de gösterilmiştir [16], [18], [19], [20].

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.7)$$

Burada ε' gerçek bileşendir ve maddenin kapasitansı ve elektrik enerjisini depolayabilme yeteneği ile ilgilidir. C malzemenin kapasitansı, C_0 boşluğun kapasitansı olduğuna göre, dielektrik sabitinin reel kısmı 2.8'deki gibi hesaplanabilir.

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (2.8)$$

ε'' sanal bileşendir ve enerji dağılımının çeşitli soğurma mekanizmalarıyla ilgilidir. Kayıplar hakkında kısaca bilgi verir [14], [21]. G malzemenin iletkenliği, w ise açılal frekanstır.

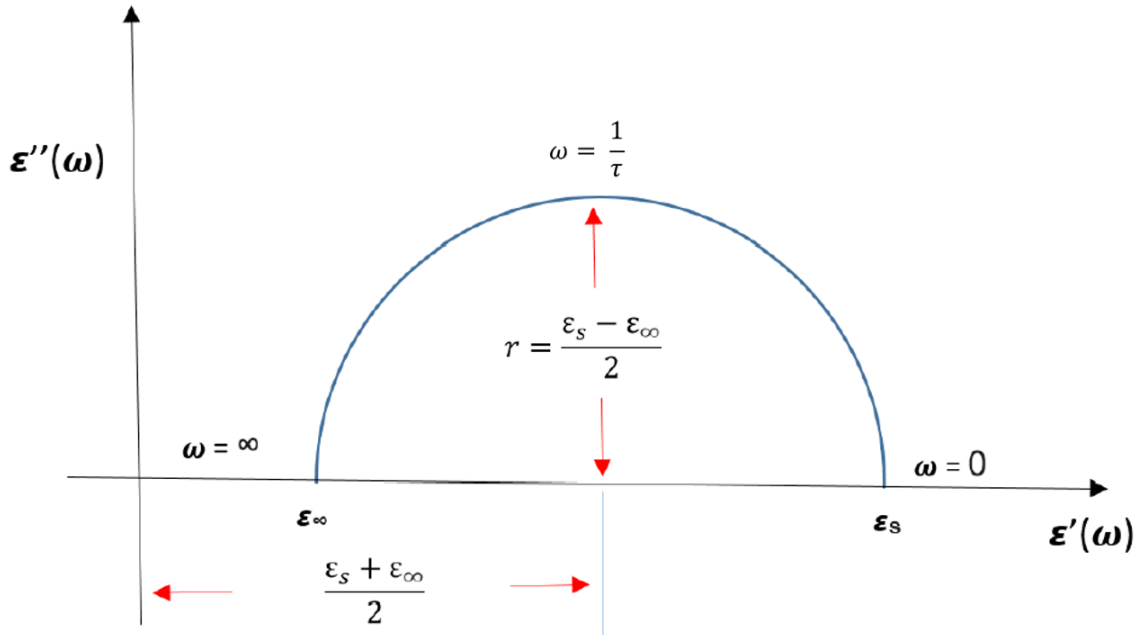
$$\varepsilon'' = \frac{G}{wC_0} \quad (2.9)$$

Kayıp tanjantı, karmaşık dielektrik sabitinin sanal kısmının reel kısma oranıdır. Dielektrikte ısı olarak açığa çıkan enerji miktarını değerlendirmek için kullanılır [15], [21].

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.10)$$

Bir dielektrik maddenin özelliklerini belirlemek için bazı ölçümler yapılır. Frekans ve sıcaklık gibi bazı değişkenlere karşı gerçekleştirilen bu dielektrik ölçümlerde maddenin belirleyici özelliklerinden olan geçirgenlik, dielektrik sabitin sanal kısımları gibi bazı nicelikler hakkında bilgi edinilebilir. Bu niceliklerin frekansın logaritmik değerine karşılık çizilen grafikleri oldukça yararlı bilgiler sağlayabilir. Ölçümlerde elde edilen sonuçlar kullanılarak pek çok grafik oluşturulabilir. Bu grafiklerden en verimli ve kullanışlı olan bir tanesi var ki, bu grafikten dielektriğin enerjiyi depolama ve kaybetme oranları net olarak görülebilir. Bu çizime “argand diyagramı” denir ve ilk defa Cole-Cole tarafından gerçekleştirildiği için “Cole-Cole çizimi” olarak ta adlandırılır. Cole-Cole çizimi, bir sistemin tek bir durulma zamanına sahip olup olmadığının bulunması için özel bir metot sağlar. Bu metot, dağılım fonksiyonunun farklı tiplerini karakterize

etmek için de kullanışlıdır [22].



Şekil 2.6. Tek durulma zamanlı dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımlarının Cole-Cole eğrileri [14].

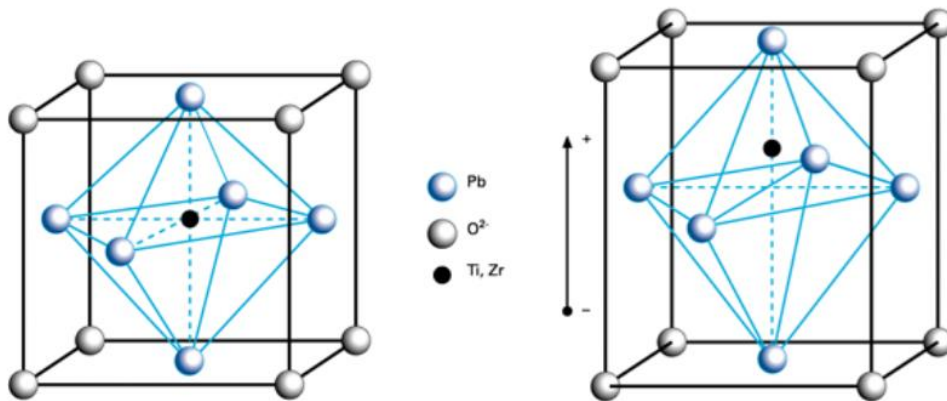
Şekil 2.6'ya göre; dielektrik materyalin merkez noktası $\epsilon''=0$ yatay eksendeki durulmayı bununla birlikte de kayıp faktörü ifadesini $1/\tau$ pik değerinde yarım dairesel bir tek durulma frekansı mevcuttur. Birçok durulma frekansına sahip olan materyallerin, Cole-Cole diyagramı $\epsilon''=0$ ekseninin aşağısında kalacak şekilde benzer ya da asimetrik yatay yarım çemberlerden oluşur. Dielektrik sabitinin sanal bileşeninin maksimum olduğu noktada yarıçap değeri bu ifadeye eşit olur. Frekans değişimi ise eğriden saat yönünün tersi istikamette yani pozitif yönde değişim gösterir [17].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada ferroelektrik özelliklere sahip $PbZr_{0.5}Ti_{0.5}O_3$ (PZT) üzerine ferromanyetik özelliklere sahip demir ve kobalt malzemeleri ayrı ayrı kaplanarak ince film elde edilmesi planlanmıştır. Bu bölümde kullanılan malzemeler, kaplama yöntemi ve analiz yöntemleri hakkında bilgi verilecektir.

3.1. $PbZrTiO_3$ (PZT) ÖZELLİKLERİ

PZT, $BaTiO_3$, $PbTiO_3$, $(Sr,Ba)TiO_3$, PLT, PLZT, $Bi_4Ti_3O_{12}$ ve $Pb_5Ge_3O_{15}$ ince film olarak hazırlanan ferroelektrik malzemelerin (bu malzemeler aynı zamanda seramiktir) başlıcalarındandır. Kurşun Zirkonyum Titanat (PZT) katı eriyik sistemleri, Japon araştırmacılar Gen Shirane, Etsuro Sawaguchi ve arkadaşları tarafından 1954 yılında ortaya çıkarılmıştır. PZT tabanlı seramikler, çeşitli kullanımlar için gerekli olan yüksek performans özelliklerini nispeten düşük bir maliyetle sağladılar ve piezoelektrik malzemelerin kralı olarak adlandırıldılar [23]. 1950'lerden beri bilim insanlarının PZT üzerine yaptığı çalışmalar gün geçtikçe arttı ve hızlandı. PZT esaslı malzemeler piroelektrik, piezoelektrik, ferroelektrik, elastooptik, kimyasal kompozisyona bağlı olarak lineer ve kuadratik elektrooptik özellikler gibi çeşitli özellikler gösterdikleri tespit edildi [24]. Bu nedenden dolayı oldukça geniş bir kullanım alanına sahip oldular. En geniş şekilde araştırılan malzeme ise perovskit yapıdaki PZT'dir. Şekil 3.1'de de PZT malzemesinin kristal yapısı görülmektedir.



Şekil 3.1. Perovskit yapıdaki PZT kristali [25].

Diğer malzemelere göre PZT'nin daha fazla çalışılmasının nedenleri arasında; Daha yüksek sıcaklıklarda çalışılmasına imkân veren Tc değerine sahip olması, kolay polarize olması, dielektrik katsayısı değerinin geniş bir aralıkta bulunması, üretilmesi kolay olması ve farklı oranlarda farklı malzeme katkılandırılmasıyla farklı özellikler kazanabilmesi sayılabilir [11].

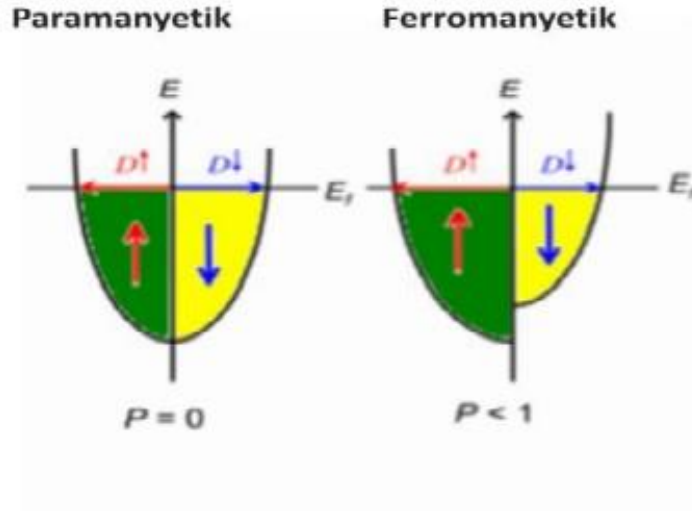
3.2. DEMİR VE KOBALT ELEMENTLERİNİN ÖZELLİKLERİ

Demir, periyodik tablonun 4. periyodunun 8. grubunda yer alan bir elementtir. Demirin atom numarası 26'dir ve metaldir. Demir, yer kabuğunda en yaygın bulunan ikinci metal ve dördüncü elementtir. Demir kolayca paslanmasına rağmen en önemli metaldir. Günümüzde işlenen metallerin %90'ı demirdir. Nikel, krom, vanadyum, tungsten, manganez gibi metallerle üretilen alaşımlar hayli sağlam olur ve işlenmeleri kolaylaşır. Köprülerden elektrikli aygıtlara, bisikletlerden kesici aletlere pek çok alanda kullanılırlar. Demirin çoğu çelik hâline getirilir ve inşaatlarda kullanılır. Demirin çeşitli metallerle bir araya gelmesiyle farklı çeşitlerde çelik üretilir. Bunların en yaygını karbon çeliğidir [26].

Kobalt (Co), periyodik tablonun 4. periyodunun 9. grubunda yer alan bir elementtir. Kobaltın atom numarası 27'dir ve metaldir. Genel olarak mıknatıs yapımında, Erime noktasının yüksek olması nedeniyle jet türbinlerinde ve gaz türbin jeneratörlerinde, paslanmaya olan direnci nedeniyle kaplama malzemelerinde ve boya, porselen, cam, çömlek ve emayelere mavi renk vermesinde, bazı ülkelerde yiyecekleri ışınla steril hâle getirmek ve uzun süre saklamak amacıyla kullanılmaktadır [27].

Demir ve kobalt, oldukça kuvvetli manyetik maddelerdir ve bunlara ferromanyetik maddeler denir. Fe ve Co gibi d orbitali geçiş metallerinin manyetizmasının kaynağı, d orbitallerinin doluluğundan kaynaklanmaktadır. 3d geçiş metalleri, 4s ve 3d değerlik elektronları barındırır. 3d orbitali görece olarak daha dar bir enerji aralığına (4-7 eV) sahipken, 4s orbitali geniş ve daha uzun erimli bir enerji aralığına sahiptir (15-20 eV) bu sebeple komşu atomlar üst üste binmektedir. Temel durumda, bütün en düşük enerji seviyeleri, Pauli dışarlama ilkesine göre elektronlarla doldurulur. En yüksek ve dolu enerji seviyesi Fermi seviyesi, E_F olarak adlandırılır. Manyetik olmayan (paramanyetik) metallerde (Şekil 3.2) enerji seviyesi yukarı ve aşağı yönlü spine sahip eşit sayıda elektronlarla doludur ve net manyetik moment yoktur. Ferromanyetik metallerde enerji

seviyelerini dolduran aşağı ve yukarı yönlü spine sahip elektronların sayısı yaklaşık olarak eşit olmalarına rağmen, enerji seviyeleri arasında birbirlerine göre bir kayma mevcuttur. Bu kayma net manyetik momentin kaynağıdır ve enerji bandında benzersiz bir doluluk şekline sebep olur [6].



Şekil 3.2. Paramanyetik ve ferromanyetik metallerin durum yoğunluğu [28].

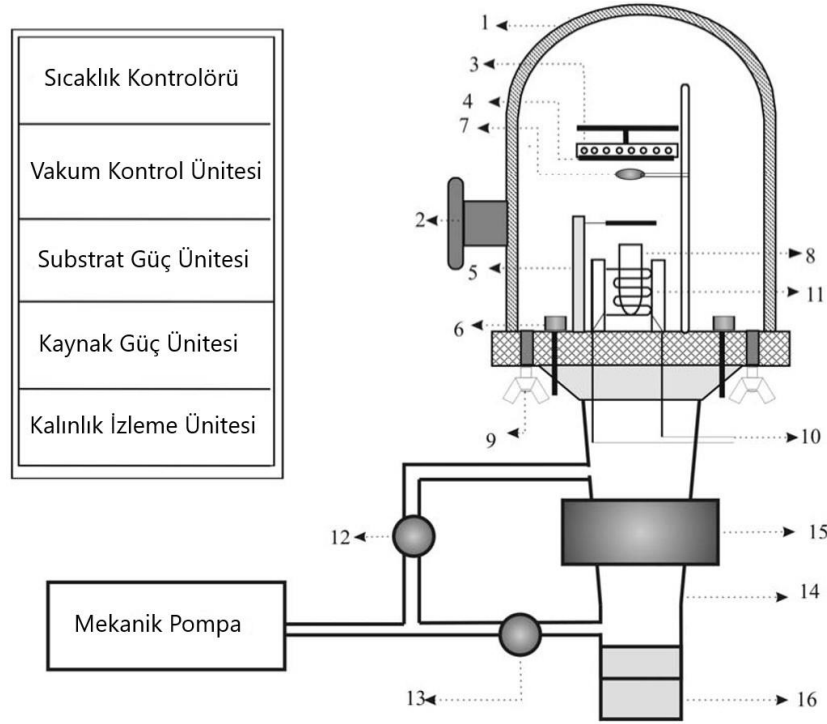
(P: Spin polarizasyon faktörü)

3.3. VAKUM BUHARLAŞTIRMA TEKNİĞİ

Vakum buharlaştırma, fonksiyonel filmlerin çeşitli alttaşlar üzerine biriktirilmesi için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Vakum, buhar parçacıklarının doğrudan alt tabaka üzerinde birikmesine izin vermek için kullanılır; burada buhar parçacıkları, tekrar katı bir duruma yoğunlaşarak işlevsel bir kaplama oluşturur. Vakum buharlaştırma işlemi iki temel aşamayı içerir: işlevsel bir malzemenin buharlaştırılması ve alttaş üzerinde yoğunlaşma. Yüksek vakumlu buharlaştırmada, kaplama malzemelerini eritmek, gazlaştırmak ve buharlaştırmak için elektrikli ısıtma veya elektron ışınıyla ısıtma kullanılır (Şekil 3.3). Kaplama malzemesinin buharı daha sonra alttaşın yüzeyine doğru hareket eder ve yavaş yavaş soğur, sonunda iyi kalitede ince bir film tabakası oluşur. Vakum, buharlaşan parçacıkların arka plandaki gazla veya diğer istenmeyen parçacıklarla çarpışmasını önlemek için kullanılır. Buharlaşan fonksiyonel malzemeler alt tabakanın yüzeyinde birikir [29].

Şekil 3.3'de gösterilen termal vakum buharlaştırma düzeneğini yakından incelersek;

1: Paslanmaz çelik fanus, 2: Pencere, 3: Yüzey ısıtıcısı, 4: Yüzey tutucu, 5: Deklanşör Kapağı, 6: Besleme kanalı, 7: Kalınlık monitörü, 8: Kaynak teknesi, 9: Hava Valfleri, 10: Filament akım telleri, 11: Kaynak ısıtıcı, 12: Kaba valf, 13: Ön Hat Valfi, 14: Difüzyon pompası, 15: Sıvı Azot Tuzağı, 16: Difüzyon Pompası ısıtıcısı.



Şekil 3.3. Termal Vakum Buharlaştırma düzeneği [30].

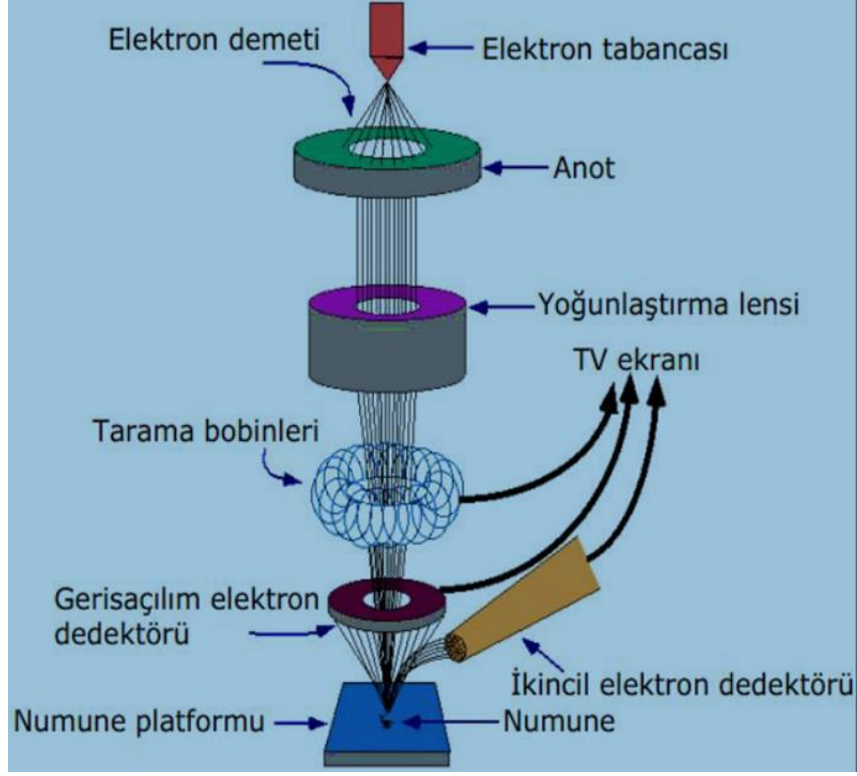
Vakum buharlaştırma teknolojisi, aşınmaya, korozyona, yüksek sıcaklıklara, oksidasyona ve radyasyona karşı dirençli, farklı fiziksel özelliklere (manyetik, iletken, vs.) sahip fonksiyonel filmleri hazırlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. [30]

3.4. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM)

Birçok mikroskop çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM). Birincisi, son iki yüzyıldan beri sınırlı yeteneklere sahip basit bir cihaz şeklinde kullanılan en eskisidir. Işık mikroskobu da denir. OM'deki çalışmanın ana prensibi, elektron emisyonuna bağlı olan SEM'den farklı olarak ışıktır. Basit OM'nun yalnızca bir merceği var iken bileşik OM'nun iki merceği vardır. Mercekler, görüntüleri büyötmek için ışığı bükmeye bağlıdır. Modern OM'nun büyötmesi orijinal boyutların 400-1000 katı aralığına ulaşır, bu da büyötmeye 300.000x'e ulaşan SEM'e kıyasla çok düşüktür. Hem canlı hücreler hem de cansız maddeler OM ile

incelenebilir. Bununla birlikte, çok az sayıda küçük organik maddeler görülebilir ve küçük katı parçalar gözlemlenebilir. Bunun nedeni, OM'nin yalnızca küçük ve ince numuneler alabilmesidir. Aksine SEM gri tonlamalı görüntülerle daha ayrıntılı bir alan sağlar. Bu nedenle, SEM'in OM'den daha pahalı olduğu ve bakımının kolay olmadığı söylenebilir. OM'den üretilen görüntüler, incelenen nesnenin gerçek renklerini gösterir. Stereo zoom optik mikroskop, petrografik mikroskop ve otomatik optik mikroskop olmak üzere OM'nin üç ticari türü vardır [31].

Orijinal adı “Scanning Electron Microscope” (SEM) olan Türkçe kullanımıyla “Taramalı Elektron Mikroskobu”, yüzey yapıları hakkında yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmek için kullanılan bir mikroskop türüdür. Elektron demetini üzerinde araştırma yapılacak numunenin yüzeyine taramalı olarak göndererek çalışır. Numunenin yüzeyinden geri yansıyan sinyalleri toplayarak yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir. Taramalı elektron mikroskopları büyük alan derinliğine sahip olduğundan dolayı araştırma yapılan örnekleri üç boyutlu olarak gözlemlemek ve inceleme yapmak mümkündür. Üzerinde araştırma yapılan örneklerle ilgili, alan derinliğinin büyüklüğü oranında bilgi elde edilebilir. Şekil 3.4’de Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazının ana bileşenleri gösterilmektedir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), üzerinde inceleme yapılan katı örneklerin yüzeyinde çeşitli sinyaller üretmek için yüksek enerjili elektronlardan oluşan odaklanmış kırıntı demetlerini kullanır. Elektron-numune etkileşimlerinden ortaya çıkan sinyaller, dış morfoloji (doku), kimyasal bileşim ve numuneyi oluşturan kristal yapı da dâhil olmak üzere numune hakkında birçok bilgi verir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), aynı zamanda numune üzerindeki seçilen noktasal yerleri incelemek için de kullanılır [32].



Şekil 3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) şematik gösterimi [33].

Taramalı Elektron Mikroskobunun (SEM) çalışma prensibi ikincil elektronlar tarafından nokta-nokta ve çizgi-çizgi oluşturulan ve gerçek olmayan üç boyutlu görüntülerdir. Bu elektronlar; örneğin yüzeyini kare şekilde taramak için gönderilen ilk ışın demeti, örnekle etkileşime girdiği anda saçılarak oluşur. İnceleme yapılan örneğin yüzeyinin herhangi bir noktasından yayılan ikincil elektronların miktarına bağlı olarak yüzeyin topografik değişimleri, kompozisyonu ve yapısı hakkında bilgi elde edilebilir. Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, elektron mikroskoplarında veya optik mikroskoplarda olduğu gibi doğrudan numunenin görüntüsünün yansıması olmayıp, televizyon yayınlarında olduğu gibi numune görüntüsünün içinde bulunduğu iki boyutlu ortamdan ekran ortamına nokta-nokta taşınması ile elde edilir. Taranan noktalardan toplanan sinyaller kuvvetlendiricilerden geçirilir ve her nokta görüntü ekranında numune üzerindeki konumuna karşılık gelen noktada parlaklık şiddetine göre belirlenir. Numune üzerindeki herhangi bir noktanın S şiddetli sinyali X ve Y koordinatları ile ekran üzerine taşınması ve bu noktaların ekran üzerinde birleşmesiyle taramalı elektron mikroskobu görüntüsü elde edilmiş olur [32].

3.5. EMPEDANS SPEKTROSKOPİSİ

Empedans Spektroskopisi, bir malzemenin elektriksel özelliklerini incelemek için kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, malzemenin frekansına bağlı olarak elektrik akımıyla karşılık verme yeteneğini ölçmeyi amaçlar. Empedans, bir elektrik devresindeki direncin (ohm) yanı sıra indüktans ve kapasitansın (farad) kompleks bir kombinasyonudur. Empedans Spektroskopisi, malzemenin bu kompleks elektriksel direncini belirleyerek, malzemenin iç yapısı, iletkenlik, dielektrik özellikleri, yüzey özellikleri ve kimyasal reaksiyonlar gibi çeşitli özelliklerini analiz etmeye olanak tanır. Bu teknik genellikle çok geniş bir frekans aralığında çalışabilir. Frekansın değiştirilmesiyle, malzeme üzerindeki farklı elektriksel olaylar veya davranışlar incelenebilir. Ölçülen verilerin analizi, malzemenin elektriksel davranışı ve özellikleri hakkında detaylı bilgi sağlar. Empedans Spektroskopisi yöntemiyle, malzemelerin yük iletim mekanizması, kimyasal reaksiyon mekanizması, dipol davranışları ve dielektrik sabitinin reel kısmı gibi özellikleri hakkında bilgi elde etmek mümkündür. Bu bilgiler, malzemenin karakterizasyonu, sensörlerin tasarımı, elektrokimya ve malzeme bilimi alanlarında kullanılabilir [14].

3.6. ÇALIŞMANIN AMACI

Ferroelektrik özelliklere sahip $PbZr_{0.5}Ti_{0.5}O_3$ seramik malzemesi elektriksel ve elektromekaniksel özelliklerinden dolayı araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir. Bu çalışmada, Ferroelektrik $PbZr_{0.5}Ti_{0.5}O_3$ (PZT) seramik malzemesi üzerine vakum buharlaştırma tekniği ile ferromanyetik özelliklere sahip Fe ve Co malzemeleri ayrı ayrı kaplanmıştır. Bu şekilde multiferroik özelliklere sahip ince filmler elde edilmesi hedeflenmiştir. Hazırlanmış ince filmlerin yüzey özellikleri, dielektrik sabitinin reel ve sanal kısmı, kayıp tanjantı, cole-cole diyagram gibi dielektrik özelliklerin frekansla değişimi incelenmiştir. Saf PZT, Fe kaplı PZT ve Co kaplı PZT ince filmlerin yüzey özellikleri SEM ile dielektrik sabitinin reel ve sanal kısmı, kayıp tanjantı, cole-cole diyagramı oda sıcaklığında frekansın bir fonksiyonu olarak yüksek frekans aralığında ölçülmüştür.

4. DENEYSEL BULGULAR

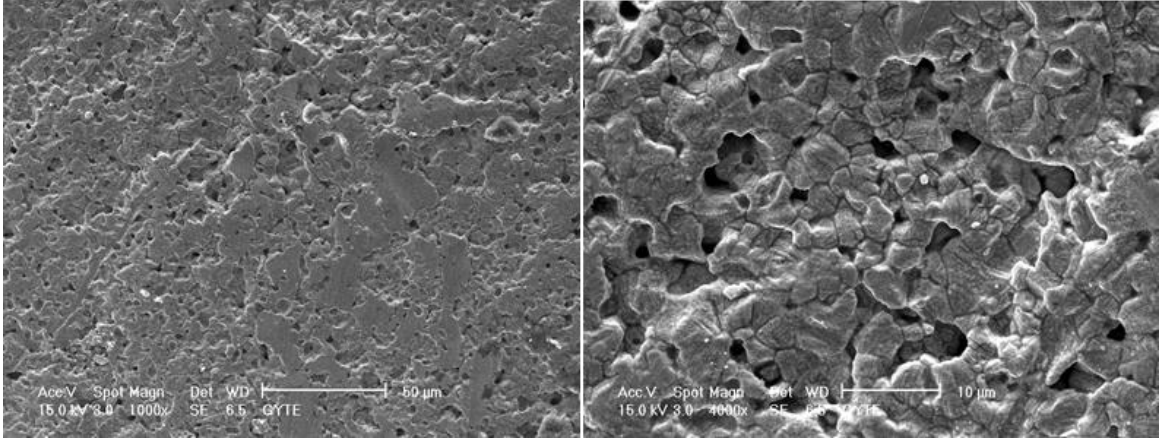
Ferroelektrik $\text{PbZr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$ (PZT) seramik malzemesi üzerine termal buharlaştırma tekniği ile ferromanyetik özelliklere sahip Fe ve Co malzemeleri, Gebze Teknik Üniversitesi laboratuvarlarında, Vakum Buharlaştırma Tekniği ile ayrı ayrı kaplanmıştır. Bu şekilde multiferroik özelliklere sahip ince filmler elde edilmesi hedeflenmiştir. Alttaş olarak seçilen PZT malzemesi 0,5 mm kalınlığındadır. Üzerine kaplanan demir ve kobalt ince filmleri ise 100 nm kalınlığındadır (Şekil 4.1)



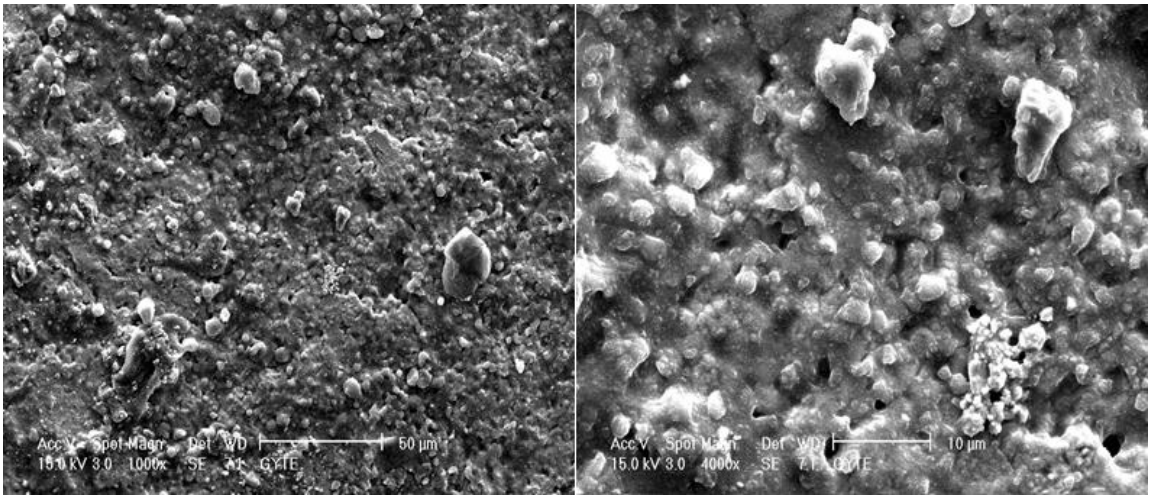
Şekil 4.1. Hazırlanan ince filmlerin temsili gösterimi.

4.1. SEM SONUÇLARI

Vakum buharlaştırma yöntemiyle kaplanmış Fe kaplı PZT (Fe/PZT) ve Co kaplı PZT (Co/PZT) ince filmlerin yüzey kontrolü Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirildi. SEM görüntülemesinde amaç, hazırlanan filmlerin yüzeylerinin kalite kontrolünü sağlamaktır. Hazırlanan ince filmlerin yapısal olarak büyük oranda polikristal olduğu tespit edilmiştir. Burada şunu da belirtmek gerekir, bu filmlerin tek kristal olması yapılan çalışmanın hedefleri arasında değildir ayrıca seçilen kaplama yöntemi de epitaksiyel yöntem olmadığı için tek kristal olması mümkün değildir. Fe/PZT ince filminin SEM sonuçları Şekil 4.2’de, Co/PZT ince filminin SEM sonuçları Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Fe/PZT ince filmlerin SEM görüntüleri.



Şekil 4.3. Co/PZT ince filmlerin SEM görüntüleri.

50 µm büyütmede Fe/PZT ince filmlerin daha pürüzsüz bir yüzeye sahipken (Şekil 4.2), Co/PZT ince filmlerin daha pürüzlü bir yapıya sahip oldukları (Şekil 4.3) görülmüştür. 10 µm büyütmede, Fe/PZT ince filmlerin tetrahedral yapıda ve gözenekler daha fazla iken, Co/PZT ince filmlerin yüzey yapısının değişip daha az gözenekli bir yapıya sahip olduğu ve kümelenmelerin olduğu görülmüştür. Ayrıca Co kaplı ince filmlerde tanecik boyutunun küçüldüğü gözlemlenmiştir.

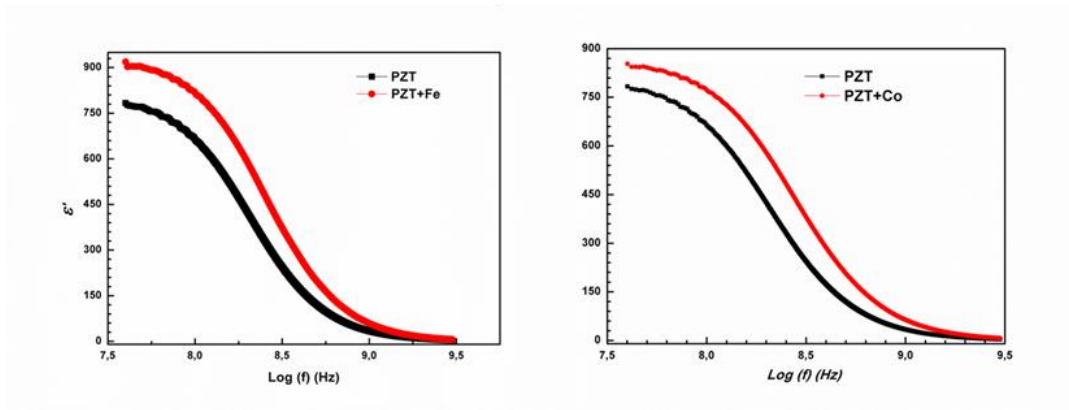
4.2. EMPEDANS SPEKTROSKOPİ SONUÇLARI

Dielektrik malzemeleri en iyi şekilde karakterize edebilen parametre olarak karşımıza çıkan dielektrik sabitinin reel ve sanal kısmının frekans bağımlılığı, bu malzemelerin teknolojiadaki uygulamaları açısından oldukça önemlidir. Dielektrik malzemelere bir dış elektrik alan uygulandığı anda, alan etkisinde kalan elektriksel yüklü elektronlar, iyonlar

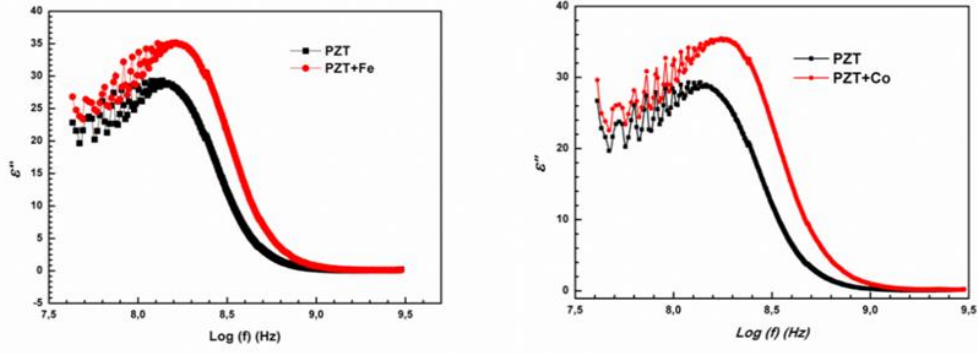
ve moleküller yön değiştirirler. Elektriksel yüklerin yön değiştirmesine bağlı olarak elektriksel yük merkezleri kayar ve neticede bir polarizasyon oluşur. Maddelerin alternatif akıma vermiş oldukları tepki, maddelerin yapılarıyla (gözenekler, arayüzey kutuplanmaları vs.) ilgili önemli bilgiler sağlaması nedeniyle kompozitlerin incelenmesinde güzel bir yöntemdir [14].

Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerinin dielektrik sabitinin reel kısmı (ϵ') - frekans bağımlılığı Şekil 4.4'te, Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerinin dielektrik sabitinin sanal kısmı (ϵ'') - frekans bağımlılığı Şekil 4.5'te, Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerinin tanjant kayıp faktör ($\tan\delta$)-frekans bağımlılığı Şekil 4.6'da, Saf PZT, Co kaplı PZT ve Fe kaplı PZT ince filmlerin dielektrik sabitinin sanal kısmı (ϵ'') - dielektrik sabitinin reel kısmı (ϵ') grafiği (cole-cole diyagramı) Şekil 4.7'de verilmiştir.

Hazırlanan ince filmlerin dielektrik özelliklerinin ölçümleri, HP 4287 A LCR Metre cihazı ile oda sıcaklığında, 1 MHz-3GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Yüksek frekansta ölçüm yapılmasının bir nedeni de PZT malzemesinin iyi bir yalıtkan olması dolayısıyla düşük frekanslarda polarizasyon gözlemlenmemesidir.



Şekil 4.4. Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerinin dielektrik sabitinin reel kısmı (ϵ')- frekans bağımlılığı.



Şekil 4.5. Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerinin dielektrik sabitinin sanal kısmı (ϵ'')- frekans bağımlılığı.

Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerinin dielektrik sabitinin reel kısmı (ϵ')- frekans bağımlılığı şekil 4.4'te gösterilmiştir. Oda sıcaklığında Saf PZT örneğinin ϵ' değeri yüksektir. Saf PZT malzemenin oda sıcaklığındaki dielektrik sabitinin reel kısmının bu kadar yüksek olmasının nedeni dipolar polarizasyondur [34]. Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerin frekans arttıkça dielektrik sabitinin reel kısmının azaldığı gözlemlenmiştir. Nispeten düşük frekans bölgesinde dielektrik sabitinin reel kısmı daha yüksek iken, yüksek frekans bölgesinde dielektrik sabitinin reel kısmının azaldığı gözlemlenmiştir. Düşük frekans bölgesinde dielektrik sabitinin reel kısmı en yüksek olan örnek Fe/PZT olurken, dielektrik sabitinin reel kısmı en düşük olan örnek ise saf PZT'dir. Tüm numunelerin artan frekansla benzer dielektrik davranışlar sergilediği gözlemlenmiştir. Uygulanan dış elektrik alanı altında malzeme içerisinde hareket eden yüklü parçacıklar dipolar polarizasyona uğrar. Bu nedenle Çizelge 4.1'den de görüldüğü gibi dielektrik parametreler düşük frekans bölgesinde yüksek değerlere sahiptir.

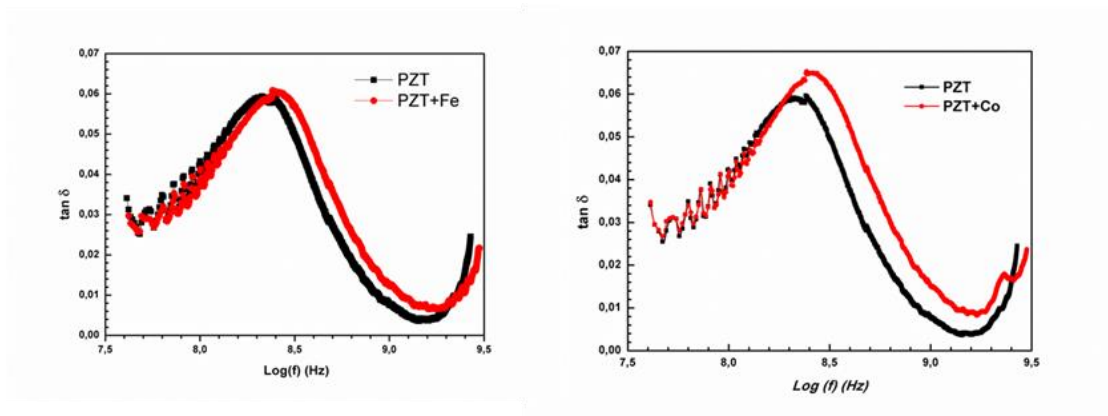
Çizelge 4.1. Hazırlanan ince filmlerin görece düşük frekansta ϵ' değerleri.

NUMUNE ADI	Log(f) (Hz)	ϵ'
PZT	7,60	783
Fe/PZT	7,60	913
Co/PZT	7,60	852

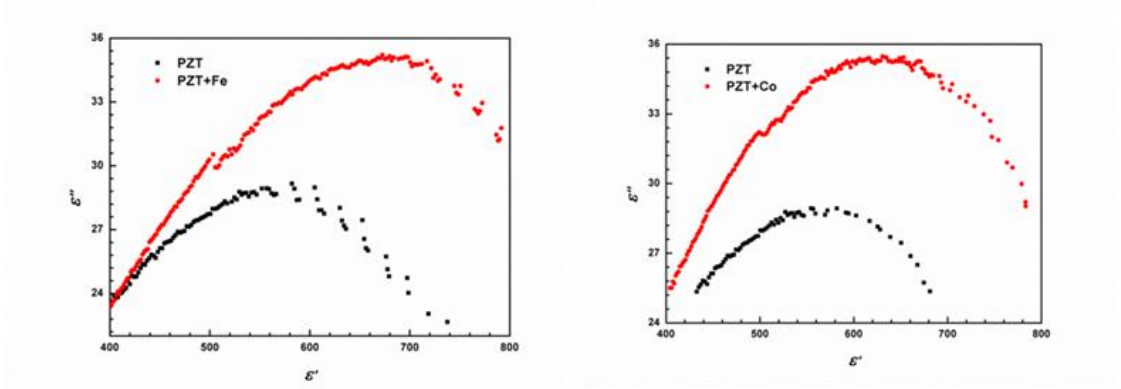
Dielektrik parametrelerin artan frekansla üstel olarak azalması, dielektrik relaksasyonun bir sonucudur. Demir ve kobalt kaplı ince filmlerde dipolar polarizasyon etkisinin artmasının temel sebebi polarizasyona olan katkılarıdır. Demir kaplı filmde bu katkıların daha fazla olması Fe ve PZT arasındaki arayüzey etkileşiminin daha az olmasından kaynaklanmaktadır. Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerinin dielektrik sabitin sanal kısmı (ϵ'') - frekans bağımlılığı Şekil 4.5'te verilmiştir. Tüm örneklerde frekans arttıkça ϵ'' 'in önce arttığı, ardından parabolik olarak azaldığı gözlemlendi. ϵ'' değerinin maksimum aldığı değerler Çizelge 4.2'de verilmiştir. Co/PZT ve Fe/PZT örneklerinin ϵ'' değerleri düşük frekans bölgesinde benzer değerlere sahipken, saf PZT örneğinin ϵ'' değeri daha düşük bir değere sahiptir.

Çizelge 4.2. Hazırlanan ince filmlerin kritik frekansta ϵ'' değerleri.

NUMUNE ADI	Dielektrik Sabitinin Sanal Kısmının (ϵ'') Pik Değeri	Kritik Frekans (Log(f)Hz)
PZT	29,15	8,13
Fe/PZT	35,14	8,21
Co/PZT	35,25	8,25



Şekil 4.6. Saf PZT, Co kaplı PZT ve Fe kaplı PZT ince filmlerin tanjant kayıp faktör ($\tan\delta$)-frekans grafiği.



Şekil 4.7. Saf PZT, Co kaplı PZT ve Fe kaplı PZT ince filmlerin dielektrik sabitin sanal kısmı (ϵ'')- dielektrik sabitin reel kısmı (ϵ') grafiği (cole-cole diyagramı).

Şekil 4.6, saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerin tanjant kayıp faktörünün ($\tan\delta$) frekansa bağlı değişimini göstermektedir. ϵ'' ve $\tan\delta$, dielektrik sabitin sanal kısımları hakkında bilgi verir ancak $\tan\delta$ malzemeyi daha detaylı incelememize olanak tanır. Saf PZT, Co kaplı PZT ve Fe kaplı PZT ince filmlerin artan frekansla birlikte $\tan\delta$ değerinde ilk önce artış, sonrasında ise azalma görülmektedir, 9,2 GHz civarında ise yeniden polarizasyon etkisi görülmektedir [34].

Şekil 4.7'de saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerin cole-cole diyagramını göstermektedir. Dielektrik malzemelerdeki enerji depolama ve kayıp faktörü hakkında bilgiyi cole-cole relaksasyon modellerinden elde edilebilir. Cole-Cole eğrileri, bir dielektrik malzeme içinde tek bir relaksasyon süresine sahip olup olmadığını belirlemek için çok önemlidir. Tek bir relaksasyon süreli dielektrik malzeme için, cole-cole eğrileri yarım daireye karşılık gelir. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi tüm numuneler için tek bir gevşeme süresi vardır ve bu bir RC devresine karşılık gelir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, vakumlu buharlaştırma yöntemiyle multiferroik ince filmler üretilmesi amaçlanmış ve multiferroik filmler başarıyla üretilmiştir. Ferromanyetik özelliklere sahip Fe ve Co malzemeleri (100 nm kalınlığında), ferroelektrik $\text{PbZr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$ (PZT) üzerine ayrı ayrı ince filmler halinde kaplanmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile hazırlanan ince filmlerin yüzey özellikleri incelenmiştir. Fe kaplı PZT ince filmlerin daha pürüzsüz bir yapıya sahip olduğu, Co kaplı PZT ince filmlerin ise daha gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Fe/PZT ince filmlerin tetrahedral yapıda ve gözenekler daha fazla iken, Co/PZT ince filmlerin yüzey yapısının değişip daha az gözenekli bir yapıya sahip olduğu ve kümelenmelerin oluştuğu görülmüştür. Ayrıca Co kaplı ince filmlerde tanecik boyutunun küçüldüğü gözlemlenmiştir.

Hazırlanan Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerin dielektrik sabitinin reel ve sanal kısmı, kayıp faktörü ($\tan\delta$), cole-cole diyagramı, 1 MHz ila 3 GHz aralığında frekansın bir fonksiyonu olarak empedans analizörü ile oda sıcaklığında ölçülmüştür. Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerin dielektrik sabitinin reel kısmının, artan frekansla azaldığı gözlemlenmiştir. Dielektrik polarizasyondan dolayı nispeten düşük frekans bölgesinde dielektrik sabitinin reel kısmı daha yüksek iken, yüksek frekans bölgesinde dielektrik sabitinin reel kısmının azaldığı gözlemlenmiştir. Düşük frekans bölgesinde dielektrik sabitinin reel kısmı en yüksek olan örnek Fe/PZT olurken, dielektrik sabitinin reel kısmı en düşük olan örnek ise saf PZT'dir. Demir ve kobalt kaplı ince filmlerde dipolar polarizasyon etkisinin artmasının temel sebebi polarizasyona olan katkılarıdır. Demir kaplı filmde bu katkıların daha fazla olması Fe ve PZT arasındaki ara yüzey etkileşiminin daha az olmasından kaynaklanmaktadır. Saf PZT, Fe/PZT ve Co/PZT ince filmlerin dielektrik sabitin sanal kısmı değerinin artan frekansla önce arttığı, daha sonra parabolik olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Düşük frekans bölgesinde Co/PZT ve Fe/PZT örneklerinin dielektrik sabitin sanal kısmı benzer değerlere sahipken, saf PZT örneğinin dielektrik sabitin sanal kısmı daha düşük bir değere sahiptir. Cole-Cole eğrileri, bir dielektrik malzeme içinde tek bir gevşeme süresine sahip olup olmadığını belirlemek için çok önemlidir. Şekil 4.6 gevşemenin 9,2 GHz civarında bittiğini ve yeniden kutuplaşmanın aynı noktada başladığını göstermektedir. Cole-cole grafiği tüm ince filmlerde tek bir gevşemenin olduğunu ve bunun bir RC devresine karşılık geldiğini

göstermektedir. Tüm sonuçlar ışığında, Fe/PZT ince filmin yüksek frekans bölgesinde daha iyi dielektrik özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca Fe/PZT filminin bilgi depolama, manyetik sensör ve manyetik bellek gibi uygulama alanları için ideal bir aday olduğunu hem deneysel olarak hem de literatürdeki çalışmalara bakarak söylemek de mümkündür [2], [35], [36], [37], [38], [39].

6. KAYNAKÇA

- [1] H. Görgün, “Teknolojide yeni ufuklar,” *Aselsan Dergisi*, sayı 113, 2022.
- [2] F. Mikailzade, B. Aktaş & M. Özdemir, “İnce film ve katmanlı yapıları yeni magnetoelektrik nano-malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesi,” Tubitak, Gebze, Kocaeli, Türkiye, 2009.
- [3] M. E. Ocak, “Yeni bir elektronik hafıza teknolojisi elektrik alan ile kontrol edilen manyetik bölgeler,” *Tubitak Bilim ve Teknik Dergisi*, sayı 560, ss 80-81, 2014.
- [4] T. Kubacka, J. Johnson, C. Vicario, P. Beaud, L. K. Huber, L. Patthey, ... & U. Staub, “Large-amplitude spin dynamics driven by a terahertz pulse in resonance with an electromagnon,” *Science*, c. 343, sayı 6177, ss. 1333-1336, 2014.
- [5] Paul Scherrer Institut (PSI), ScienceDaily Your source for the latest research news, (2014, 6 Mart). [Çevrimiçi]. <https://www.sciencedaily.com/releases/2014/03/140306142701.htm>. [Erişildi: Cumartesi Ocak 2024].
- [6] A. İntepe, “Spintronik uygulamalarında kullanılan La₂NiMnO₆ ve CrO₂ ince filmlerinin manyetik özellikleri,” Doktora Tezi, Fizik Ana Bilim Dalı, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, Kocaeli, Türkiye, 2012.
- [7] R. A. Serway & R. J. Beichner, *Fen ve Mühendislik İçin Fizik*, Ankara, Türkiye: Palme Yayıncılık, 1992.
- [8] B. D. Cullity & C. D. Graham, *Introduction to Magnetic Materials*, Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Press, 2009.
- [9] N. A. Spaldin, *Magnetic Materials, Fundamental and Device Applications*, Cambridge, UK.: Cambridge University Press, 2003.
- [10] Y. Takura & N. Nagaosa, “Orbital physics in transition metal oxides,” *Science*, c. 288, sayı 5465, ss. 462-468, 2000.
- [11] M. Özenbaş, “Ferroelektrik seramik ince filmler,” Tubitak, Ankara, Türkiye, 1998.
- [12] K. C. Kao, *Dielectric Phenomena in Solids with Emphasis on Physical Concepts of Electronic Processes*, Amsterdam, Netherland; Boston, USA: Academic Press, 2004.

- [13] W. D. Callister Jr. & D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering an Introduction*, New York, USA: John Wiley and Sons, 2015.
- [14] M. Öztürk, “Bazı metal ve boya iyonları katkılı hidrojellerin dielektrik özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fizik Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye, 2018.
- [15] D. Delipınar, “Probertit, elektrokoagülasyon termal atık ve elektrokoagülasyon bor atığının dielektrik özelliklerinin empedans spektroskopisi yöntemi ile incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fizik Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.
- [16] R. Coşkun, M. Okutan, O. Yalçın & A. Kösemen, “Electric and magnetic properties of hydrogels doped with Cu ions,” *Acta Physica Polonica A*, c. 122, sayı 4, ss. 683–687, 2012.
- [17] S. Zengin, “Farklı montmorillonit kil numunelerinin dielektrik özellikleri üzerine nemin etkisi,” Yüksek lisans tezi, Fizik Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2007.
- [18] M. S. Cho, Y. H. Cho, H. J. Choi & M. S. Jhon, “Electrorheological characterization of polyaniline-coated poly (methyl methacrylate) suspensions,” *Colloid and Polymer Science*, c. 280, ss. 1062-1066, 2002.
- [19] B. K. P. Scaife, *Principles of Dielectrics*, Oxford, UK.: Clarendon Press, 1989.
- [20] A. Kaya & H. Y. Fang, “Identification of contaminated soils by dielectric constant and electrical conductivity,” *Journal of Environmental Engineering*, sayı 123, ss 169–177, 1997.
- [21] C. D. Everard, C. C. Fagan, C. P. O’donnell, D. J. O’callaghan & J. G. Lyng, “Dielectric properties of process cheese from 0.3 to 3 GHz,” *Journal of Food Engineering*, c. 3, sayı 75, ss. 415-422, 2006.
- [22] V. V. Daniel, *Dielectric Relaxation*, London, UK.; New York, USA: Academic Press, 1967.
- [23] K. Uchino, *Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology*, Abington Hall, Granta Park, Great Abington, Cambridge UK.: Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [24] N. Dharmaraj, C. H. Kim & H. Y. Kim, “Pb(Zr_{0.5}, Ti_{0.5})O₃ nanofibres by electrospinning,” *Materials Letters*, c. 59, ss. 3085–3089, 2005.
- [25] F. Wang, “Shape optimization for piezoceramics,” Doktora Tezi, Bilgisayar Bilimi ve Matematik, Elektrik Mühendisliği Fakültesi, Paderborn University, Paderborn,

- Germany, 2007.
- [26] Tubitak Bilim Genç, (2021, 14 Ocak). [Çevrimiçi]. <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/periodyik-tablo/demir>. [Erişildi: 7 Ocak 2024].
- [27] Tubitak Bilim Genç, (2021, 14 Ocak). [Çevrimiçi]. <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/periodyik-tablo/kobalt>. [Erişildi: 7 Ocak 2024].
- [28] H. Jalili, “Materials physics of half-metallics magnetic oxide films by pulsed laser deposition: controlling the crystal structure and near-surface properties of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ and CrO_2 films,” Doktora Tezi, Fizik Bölümü, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2008.
- [29] Q. Wei, Y. Xu & Y. Wang, “Textile surface functionalization bu physical vapor deposition (PVD),” *Surface Modification of Textiles*, Woodhead Publishing Limited, 2009, ss. 58-90.
- [30] Ş. M. Huş, “Physical properties of CdSe thin films produced by thermal evaporation and e-beam techniques,” Yüksek Lisans Tezi, Fizik Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.
- [31] Michigan Technological University. Department of Civil and Environmental Engineering; Applied Pavement Technology, Inc., “Guidelines for detection, analysis, and treatment of materials-related distress in concrete pavements: volume 1,” Federal Highway Administration Research and Technology, Michigan, USA, 2002.
- [32] S. K. Chapman, *Working with a Scanning Electron Microscope*, London, UK.: Lodgemark Press Ltd., 1986.
- [33] M. Joshi & A. Bhattacharyya, “Characterization techniques for nanotechnology applications in textiles,” *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, sayı 33, ss 304-317, 2008.
- [34] G. G. Raju, “Dielectric loss and relaxation—I,” *Dielectrics in Electric Fields*, Florida, USA, CRC Press, 2003, ss. 63.
- [35] G. A. Prinz, “Magnetoelectronics,” *Science*, c. 282, sayı 5394, ss. 1660-1663, 1998.
- [36] G. A. Prinz, “Magnetoelectronics applications,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, c. 200, sayı 1-3, ss. 57–68, 1999.
- [37] K. Ueda, H. Tabata & T. Kawai, “Coexistence of ferroelectricity and ferromagnetism in BiFeO_3 – BaTiO_3 thin films at room temperature,” *Applied Physics Letters*, c. 75, sayı 4, ss. 555-557, 1999.

- [38] M. Okutan, M. Öztürk, A. Kırsoy, İ. Araz, T. Yener & O. Yalçın, “Analysis of electromagnetic properties of Ce–Zn substituted barium hexaferrite for electronic circuit applications,” *Physica B: Condensed Matter*, c. 630, 2022.
- [39] L. P. Silva Neto, J. Rossi, J. J. Barroso & A. Silva, “Characterization of ceramic dielectrics for sub-GHz applications in nonlinear transmission lines,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, c. 42, sayı 10, ss. 3274-3282, 2013.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ahmet DEMİRKAYA

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Fizik	Düzce Üniversitesi	2024
Lisans	Astronomi ve Uzay Bilimleri	Ankara Üniversitesi	2011
Lise	Fen Bilimleri	Açıköğretim Lisesi	2002