

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Co NANO PARÇACIKLAR İÇEREN KOMPOZİT YAPILI
BaTiO₃ İNCE FİLMLEDE MANYETOELEKTRİK ÖZELLİKLERİN
İNCELENMESİ

UMUT ACAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2016

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

C₀ NANO PARÇACIKLAR İÇEREN
KOPMOZİT YAPILI BaTiO₃ İNCE FİLMLEDE
MANYETOELEKTRİK ÖZELLİKLERİN
İNCELENMESİ

UMUT ACAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF.DR. FAİK MİKAILZADE

GEBZE
2016

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND
APPLIED SCIENCES

INVESTIGATIONS OF
MAGNETOELECTRICAL PROPERTIES OF
BaTiO₃ COMPOSITE THIN FILMS WITH Co
NANOPARTICLES

UMUT ACAR
MASTER THESIS
DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR
PROF.DR. FAİK MİKAILZADE

GEBZE
2016



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 27 /06 / 2016 tarih ve 2016/43 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 21./07/2016 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Umut ACAR' ın tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : PROF.DR. Faik MİKAILZADE

ÜYE

: Prof. Dr. Mirhasan SEYİTSOY

ÜYE

: Doç. Dr. Kemal ÖZDOĞAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Ferroelektrik ve ferromanyetik özellikleri bir arada bulunduran malzemeler multiferroikler adı ile bilinmektedir. Dikkat çekici fiziksel özellikleri ve çok fonksiyonluluğu nedeni ile bu malzemeler son yıllarda araştırmacıların yoğun ilgi odağında bulunmaktalar, bu da sonuçta onların bilişim teknolojileri, radyoelektronik, optoelektronik, kısa dalga elektroniği gibi alanlarda uygulanma olasılıklarını önemli ölçüde yükseltmiştir. Multiferroik malzemelerde ferroelektrik ve ferromanyetik yapılanmalar arasında ortaya çıkan güçlü etkileşim, onlarda manyetoelektrik etkinin (ME) ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu etkiye göre, yapıdaki elektriksel kutuplaşma manyetik alan etkisi ile, diğer taraftan mıknatıslanma da elektrik alanı etkisi ile değiştirilebilir. Bu etkinin gözlenmesi, multiferroik malzeme ve yapıların spintronik, sensor teknolojileri, hafıza elemanları gibi modern teknoloji alanlarında kullanım potansiyelinin artmasına neden olmaktadır.

Bu tez çalışmasında iyon demeti püskürtme (ion beam sputtering) yöntemiyle Co nano parçacıklar içeren kompozit yapıları $BaTiO_3$ ince filmlerde magneto-elektriksel özellikler incelenmiştir. İyon-demeti tekniği kullanılarak oluşturulan kompozit yapıların yapısal, elektrik, manyetik ve manyetoelektrik özelliklerinin kontrollü ve mükayeseli şekilde incelenmesi, bunun sonucunda adı geçen yapılarda manyetoelektrik etkileşme mekanizmalarının öğrenilmesi ve aynı zamanda teknolojik uygulamalarda büyük öneme sahip olacak yüksek manyetoelektrik etki oranlarının elde edilmesi, tezimizin amaçları arasında bulunmuştur.

Yapısal incelemeler, manyetik rezonans ve mıknatıslanma ölçümlerinde, numunelerin manyetik nano parçacıklar içerdiği gözlenmiş olup, farklı manyetik alanlar altında kapasitans ölçümleri alınarak, dielektrik sabiti incelenmiş ve manyetokapasitans (manyetodielektrik) etkiler gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: iyon demeti püskürtme, ferromanyetik malzemeler, multiferroik malzemeler, kompozit yapıları malzeme, manyetoelektrik etki.

SUMMARY

Materials that contain a combination ferroelectric and ferromagnete are known as multiferroics. In recent years researches have been intensisived these materials due to their remakable physical properties in multifunctional. This increased significantly the possibility of implementation in areas such as information technology, radio electronic, optoelectronic, short-wave electronics. Strong interaction that appears between ferroelectronic and ferromagnetic structers in multiferroic metarials leads to the emergence of mangneto-electric effect. This effects include the change of electrical polarizaton in the structure on the other hand magnetization is influenced by electric field. The observation of this effect leads to increased use of application so as spintronics, sensor Technologies and memory elements in modern technology area.

In this thesis, magneto-electrical properties that contain Co nano particles by ion bean sputtering method composites mode BaTiO_3 was studied. Learning magneto- electric interaction mechanism in the a forementioned and also to obtain a high magneto-electric effect rate that will have great importance in technological applications was found purposes of this thesis.

In structural analysis and magnetization and magnetic resonance measurements were observed that samples contain nanoparticles. under different magnetic fields dielectric constant and magnetic capacitance calculations were observed magnetoelectric effect.

Key Words: ion beam sputtering , ferromagnetic materials, multiferroik materials, composite materials, vibrating sample magnetometer (VSM).

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐmam esnasında, tez konumun seçiminde ve bilimsel yeteneklerimin geliŐtirilmesinde. Bana maddi ve manevi imkanlar sunan ayrıca her ihtiyaç duyduğumda değerli vaktini, bilgi ve önerisini paylaşan tez danıŐmanım sayın Prof. Dr. Faik MİKAİLZADE'ye sonsuz teşekkür ederim.

Yüksek lisans esnasında kendisinden çok Şey öğrendiğim ArŐ. Gör. Maksut MAKSUTOĞLU'na

Maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen tüm dostlarıma teŐekkürü bir borç bilirim. İnanıyorum ki bu değerli insanlar bütün destekleriyle sonsuza kadar benimle olacaklardır.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Dielektrik ve Ferroelektrikler	3
2.1.1. Dielektrik Sabiti ve Kapasitans	3
2.2.2. Ferroelektrik Malzemeler	10
2.2. Manyetik Malzemeler	13
2.2.1. Diyamayetik ve Paramanyetik Malzemeler	13
2.2.2. Ferromanyetik Malzemeler	14
2.3 .Multiferroikler Malzemeler ve Manyetoelektrik Etki	16
3.DENEYSEL TEKNİKLER	20
3.1. İyon Demeti Püskürtme Yöntemi (İon Beam Sputtering)	21
3.2. X Işınları Kırınım Yöntemi	26
3.3. Taramalı Elektron Mikroskopu	29
3.4. Miktanıslanma Ölçüm Tekniği	30
3.5. Manyetik Rezonans Ölçüm Tekniği	33
3.6. Dielektrik Sabiti Ölçümleri	35
4.DENEYSEL BULGULAR	38
4.1. Yapısal İncelemeler	38
4.2. Manyetik Özellikler	39
4.3. Dielektrik Özellikler	44
4.4. Manyetoelektrik Etkiler	44
5. SONUÇLAR	48

6. KAYNAKLAR

49

7. ÖZGEÇMİŞ

52



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

Co	:	Kobalt
t	:	Elektronun termal hızı
Ba	:	Baryum
M	:	Mıknatıslanma
O	:	Oksijen
Oe	:	Oersted
Δ	:	Değişim
ϵ	:	Dielektrik sabiti
nm	:	Nanometre
μ	:	Mobilite
Ti	:	Titanyum
Hz	:	Hertz
eV	:	Elektronvolt
AFM	:	Antiferromanyetik
FM	:	Ferromanyetik
FMR	:	Ferromanyetik Rezonans
TMR	:	Tünelleme Manyetodirenç
VSM	:	Titreşimli Örnek Manyetometresi
T	:	Sıcaklık

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Basit bir kondansatör şeması.	5
2.2: Temel olarak bir kondansatör.	6
2.3: Alternatif alan frekansının dielektrik sabitine etkisi.	9
2.4: Ferroelektrik kristallerde polarizasyon-elektrik alan grafiği.	10
2.5: Ferromanyetik bir maddenin mıknaslanma yada histerizis eğirişi.	15
2.6: Manyetoelektrik etkinin bileşenleri.	17
2.7: Multiferroikler ve manyetoelektrikler arasındaki ilişki.	18
3.1: Co katkılı kompozit BaTiO ₃ kristal.	20
3.2: Elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi.	21
3.3: Sıçratma mekanizması.	22
3.4: Diyot sıçratma yöntemi.	23
3.5: Triyot suçratma sistemi.	24
3.6: Manyetik sıçratma yöntemi.	25
3.7: İyon demeti sıçratma.	25
3.8: Kristallerin x-ışını analizi.	28
3.9: X ışını üreten sol üst başlık ile dedektör.	28
3.10: XRD ölçüm cihazı.	29
3.11: SEM ölçüm cihazı.	30
3.12: PPMS'in ölçüm yönteminin şematik gösterimi.	31
3.13: Mıknatıslanma ölçümlerinde kullanılan PPMS.	32
3.14: Manyetik rezonans ölçüm düzeneğinin resmi.	34
3.15: Manyetik rezonans ölçüm düzeneğinin şeması.	34
4.1: IBSD yöntemi ile sentezlenmiş ve 750°C sıcaklığında vakum ortamında 30 dakika süresince tavllanmış BaTiO ₃ :Co kompozit ince filmlerinin X-ışın kırınım spektreleri.	45

4.2:	BaTiO ₃ :Co kompozit ince filminin yüzey morfolojisi.	39
4.3:	Farklı sıcaklıklarda ölçülmüş BaTiO ₃ :Co kompozit ince filminin ferromanyetik histerisis eğrileri .	41
4.4:	Düzlem dışı ölçüm geometrisinde manyetik alanın farklı yönelimlerinde BaTiO ₃ :Co kompozit ince filminin manyetik rezonans spektreleri.	42
4.5:	BaTiO ₃ :Co kompozit ince filmde ferromanyetik rezonans alanının açısal bağımlılıkları.	43
4.6:	BaTiO ₃ :Co kompozit ince filminin kapasitansının sıcaklığa bağlı değişimi.	44
4.7:	BaTiO ₃ :Co kompozit ince filminin manyetik alanın fonksiyonu olarak kapasitansındaki değişim oranı.	45
4.8:	BaTiO ₃ :Co kompozit ince filminin, farklı manyetik alan değerlerinde ısıtma ve soğutma rejimlerinde ölçülmüş kapasitansının sıcaklığa bağlı değişimi.	46

1.GİRİŞ

Çağımızda bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelerde, yüksek performanslı manyetik özelliklere sahip malzeme ve yapıların uygulanması büyük önem taşımaktadır. Manyetik okuma yazma kafası, manyetik sensör teknolojisi ve bellekler, mikrodalga elektronik aletler hep bu tür malzeme ve yapıların geliştirilmesi sonucunda ortaya çıkan uygulama alanlarıdır. Özellikle, son yıllarda dev manyetodirenç (“giant magnetoresistance” – GMR) etkisinin, başka bir deyimle, spine dayalı elektriksel direnç kavramının ortaya çıkması, spintronik denilen yeni bir bilimsel alanın oluşumuna neden olmaktadır. Öyle bekleniyor ki spintronik alanındaki çalışmalar gelecekte hafıza ve mantık unsurlarını beraberinde barındıran bilgisayarların gelişimini sağlayacaktır.

Ancak, GMR yapılarda ortaya çıkan önemli problem, spin transferi ile etkin bölgeye enjekte olmuş spin akımının, yapılara etkiyen dış manyetik alana istenmeyen etkilerin oluşmasıdır. Bu problemin çözümü olarak, bu yapılarda mıknatıslanmanın manyetik alanla değil, elektrik alanla kontrolü düşüncesi ortaya çıkmıştır.

Manyetik ve elektirik etkilerin birbirine bağlanması açısından ferroelektrik ve ferromanyetik özellikleri bir arada barındıran multiferroik malzemeler büyük öneme sahiptir. Dikkat çekici fiziksel özellikleri ve çok fonksiyonluluğu nedeni ile bu malzemeler son yıllarda araştırmacıların yoğun ilgi odağında bulunmaktalar, bu da sonuçta onların bilişim teknolojileri, radyoelektronik, optoelektronik, kısa dalga elektroniği gibi alanlarda uygulanma olasılıklarını önemli ölçüde yükseltmiştir. Multiferroik malzemelerde ferroelektrik ve ferromanyetik yapılanmalar arasında ortaya çıkan güçlü etkileşim, onlarda manyetoelektrik etkinin (ME) ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu etkiye göre, yapıdaki elektriksel kutuplaşma manyetik alan etkisi ile, diğer taraftan mıknatıslanma da elektrik alanı etkisi ile değiştirilebilir.

Ancak, aynı kristal yapı içinde hem ferroelektrik, hem de ferromanyetik düzeni barındıran çok az sayıda kristal vardır. Bunun nedeni, elektriksel kutuplaşmaya neden olan iyonik yerdeğiştirme ile manyetik düzene neden olan atomların kısmen dolu *d*-seviyeleri arasında çelişkinin olmasındadır. Ancak, konu ile ilgili daha önceki çalışmalardan da anlaşıldığı üzere, ayrılıkta ferroelektrik ve ferromanyetik tek fazlı kristallerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan kompozit yapılarda çok daha güçlü ve etkin ME gözlenmektedir[4]. Özellikle, ferromanyetik nanopartiküllerin ferroelektrik

malzeme içinde yerleştirilmesi ile üretilen kompozit yapılarda teknolojik uygulamalar için çok faydalı olabilecek dev manyetoelektrik etki gözlenmektedir[1].

Böylece, ferroelektrik kristal matris içine manyetik nanoparçacıkların dahil edilmesi sonucunda oluşuracak yeni multiferroik malzemelerin yapımı ve karakterizasyonu ilgi merkezindedir. Yapısal ve fiziksel özellikleri büyük oranda kontrol edilebilecek bu malzemelerin üretimi için çok sayıda çeşitli üretim teknikleri bulunmaktadır. Bu teknikler içinde en ilgi çekici olanlardan birisi, iyon-implantasyonu tekniğidir. Özellikle, metal parçacık dağılımı ve yoğunluğunun kolay kontrolü, istendiği şekilde metal-dielektrik oranının elde edilebilirliği, üretim süresinde kompozit oluşturacak malzemelerin kimyasal ve termodinamik denge koşullarının aranmasına gerek kalmaması, bu tekniğin önemli avantajları sırasındadır. Aynı zamanda, BaTiO₃ temelinde nanokompozit ince filmlerin üretimi için bir başka ilgi çekici üretim tekniği – iyon-demeti tekniğidir. Böylece çeşitli teknikler kullanılarak oluşturulan kompozit yapıların yapısal, elektrik, manyetik ve manyetoelektrik özelliklerinin kontrollü ve mükayeseli şekilde incelenmesi, bunun sonucunda adı geçen yapılarda manyetoelektrik etkileşme mekanizmalarının öğrenilmesi ve aynı zamanda teknolojik uygulamalarda büyük öneme sahip olacak yüksek manyetoelektrik etki oranlarının elde edilmesi, önemli bir konudur ve çalışmamızın amacını oluşturmuştur.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında, yeni multiferroik yapıların geliştirilmesi amacı ile iyon demeti püskürtme yöntemleri kullanılarak üretilen, içinde Co nanoparçacıkları bulunan perovskite yapılı ferroelektrik BaTiO₃ ince film multiferroik malzemelerin yapısal, manyetik ve manyetoelektrik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışma ile kararlı, verimli ve ucuz multiferroik malzemelerin üretimi ve geliştirilmesi konusunda literatüre katkıda bulunmayı hedefledik.

Bu tezin başlangıç kısmında dielektrik, ferroelektrik ve manyetik malzemeler hakkında genel bilgiler, multiferroik malzemeler ve manyetoelektrik etkiler, daha sonra bileşiğin hazırlanma yöntemi ve kullanılan ölçüm teknikleri hakkında genel bilgiler verilmektedir. Tezin son kısmında ise yapılan SEM, XRD, manyetik rezonans, mıknatıslanma ve dielektrik ölçüm sonuçları verilmektedir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Dielektrik ve Ferroelektrikler

2.1.1. Dielektrik Sabiti ve Kapasitans

Dielektrik maddelerin özellikleri, fizikçiler, kimyacılar, elektrik mühendisleri ve biyologlar gibi farklı dallardan bilim insanlarının ilgisini çekmiştir. Bu çalışmalar farklı alanlarda dallanmıştır, örneğin mühendisler, dielektrik maddelerin değişik elektrik alan ve farklı sıcaklıklarda enerji kaybının ölçümleriyle ilgilenirken, kimyacılar bu bilgi ve verilerle atom ve moleküllerin yapıları üzerine araştırmalar yapmaktadırlar. Fizikçilerin ise bu maddelerdeki enerji kayıpları ve gözlemlenen diğer sonuçların neden olduğuyla ilgili mekanizmaları incelemek adına çalışmalar yapmaktadırlar. Bu araştırma dalları dahada uzatılabilir. Bu nedenle ve daha birçok farklı amaçlar doğrultusunda dielektriklerin değişik özelliklerinin araştırılması ve ortaya çıkan deneysel verilerin analizlerinin yapılabilmesi ve yorumlanabilmesi için dielektrik kuramların geliştirilmesi zorunlu bir hal almıştır ve bu konu üzerindeki gerek deneysel gerek kuramsal çalışmalar olanca hızıyla devam etmektedir.

Öncelikle, dielektrik davranış yalıtkan malzemelerde gördüğümüz bir davranıştır. Fakat sadece yalıtkan sözcüğünü kullanırsak malzemenin elektrik iletme becerisinin, çok zayıf olduğuna vurgu yapmış oluyoruz. Yalıtkan olarak nitelendirilen malzemeler $E \leq 10 \text{ V/m}$ dielektrik sınırının altında uygulanan elektrik alanında hiçbir elektriksel iletkenlik göstermeyen maddedir. Dielektrik dediğimizde şunu unutmamalıyız ki malzememiz kutuplanma özelliğine sahiptir, Yani bir çift kutup yapısı sergiler.

İki yük ele alalım biri eksi biri artı olsun, eksiden artıya bir vektör öngörelim. Artı yükten eksi yüke giden bu vektör çift kutup momenti (dipol momenti) olarak adlandırılır. Burada arada kalan mesafeyi bir şekilde değerlendirmemiz gerekiyor, buna 'd' diyelim. Çift kutup momenti eksi yükten artı yüke uzanan bir vektördür, bu vektörü 'P' ile ifade edersek doğrultusu söylediğimiz gibi eksiden artıya doğru, büyüklüğünde

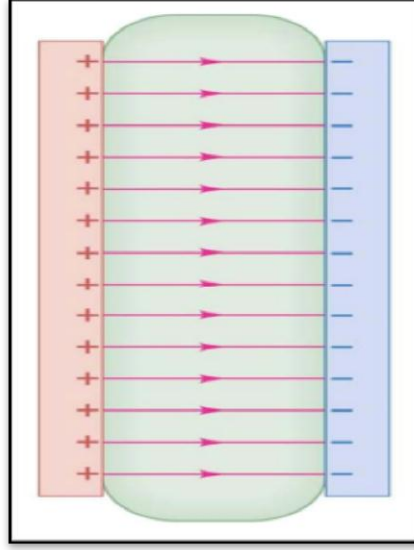
$$P = qd \quad (2.1)$$

olur. Aslında bu vektör şu demek herhangi bir elektrik alana maruz kalındığında bu vektör elektirik alana paralel olarak yönelir.

Dielektrik etki denildiğinde belli bir elektrik alan altında enerji depolayabilme ve bunun sonucunda ne kadar enerji kaybolduğunu anlamalıyız. Dielektrik sabiti mevcut elektirik alanı negatif yönde etkileyen yani azaltan bir etkidir. Katı malzemelerde önemli bir unsur olan dielektrik kimyasal analiz tekniklerinden daha kullınılı olduğundan tercih sebebidir.

Elektiriği iletmemesine rağmen elektrik alandan çokça etkilenirler. Elektirik alan altında değişen yük merkezi bir kutuplanmaya neden olur. Bu dipoller sayesinde yüzeyde bir yük depolanması oluşur. İşte bu özellik kondansatörün temel prensibidir. Yalıtkanlarda görülen bu kutuplanma özelliği yük transferini engellemektedir.

Temel olarak yük depolamada kullanılan kondansatörler bir çok devrenin vazgeçilmez elemanıdır. Mesela radyolarda frekans ayarı için, trafiğe çıkan çoğu taşıtın ateşleme sistemlerinde, fotoğraf makinalarının flaşlarında ve voltaj kaynaklarında filtre olarak kullanılmaktadır. Herhangi bir ortamda aralarında belli bir uzaklık bulunan üzerlerinde eşit ve zıt yükü olan iki iletkenin oluşturduğu sisteme genel anlamda kondansatör denilmektedir. Bu iletkenlere şekillerine bakılmaksızın kondansatörün plakası denilmektedir. Konunun daha rahat incelenmesi yönünden şimdilik iletkenlerin boşlukta olduğunu farz edeceğiz. Her iki iletkenin taşıdığı yük miktarı Q ve iletkenler arasındaki potansiyel farkı V ise kondansatör bu iki nicelikle tarif edilir. Bu durumda kondansatörün net yükü sıfır olup V potansiyeli iletkenler arasındaki potansiyel farkıdır. Şekil 2.1'de verilen kondansatörün plakalarını eşit ve zıt işaretli olarak yüklemek teknik olarak oldukça kolaydır. Bu plakalar bir pilin iki kutbuna kısa süreli olarak bağlanarak elde edilir.



Şekil 2.1: Basit bir kondansatör şeması.

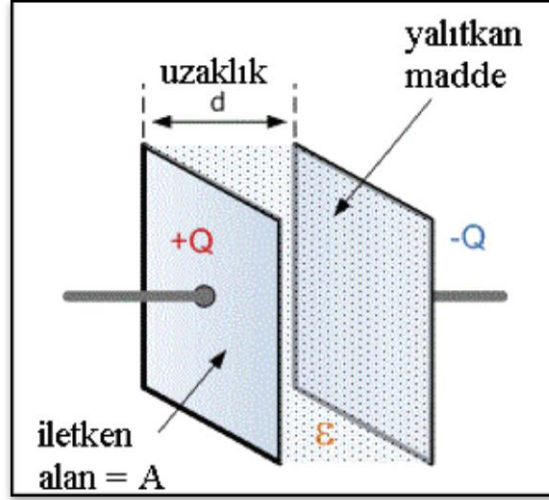
Yapılan incelemelere göre bir kondansatörün üzerindeki yük ile potansiyel farkı doğru orantılıdır ve bu C orantı sabiti olmak üzere

$$Q = C V \quad (2.2)$$

bağıntısıyla verilir. C sabitine fizik anlamda, kondansatörün sığa'sı denilmektedir. Sığa, değeri her zaman pozitif olan fiziksel bir niceliktir. Bu bağıntıdan

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.3)$$

elde edilir. Aynı zamanda kondansatör'ün sığası paralel plakalar arasındaki uzaklıkla ters, plakaların yüzey alanıyla doğru, ortadaki maddenin elektirik geçirgenliğiyle doğru orantılı olarak değişir. Yani formülle ifade edecek olursak (2.4)' deki gibi olur.



Şekil 2.2: Temel olarak kondansatör.

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.4)$$

Burada ϵ_0 vakumun elektiriksel geçirgenliğidir ve değeri $8.85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$, dir, S I birim sisteminde sığa birimi Farad'dır, ve 1 Farad = 1 Volt / 1 Coulomb olur. Kondansatörler teknolojiye ve fizikte çok kullanılan önemli düzeneklerdir.

Kondansatörlerin elektrik alan üretiminde kullanıldığından bahsetmiştik. Plakalar arasında depolanan yükler sayesinde enerjide depolanabilir. Mesela fotoğraf makinalarında depolanan bu yük sayesinde enerji depolanabilir ve flaşlar bu sayede çalışır. Büyük boyuttaki kondansatörlerin levhaları arasında biriken bu enerji elektronları ışık hızı mertebesine kadar hızlandırmak için kullanılır (elektron siklotronu). Sonuç olarak kondansatörsüz bir elektrik aleti düşünülemez.

Kondansatörler, esas olarak hava veya başka bir dielektrik ortamla ayrılmış birbirlerine bakan yakın iki iletken levhadan oluşmuş bir düzenektir. Genel olarak paralel düzlem levhalar, aynı eksenli silindirler veya aynı merkezli küreler biçiminde yapılırlar. Bu levhalar arasında, bir pil, bir radyo anteni veya bir başka potansiyel kaynağı ile bir potansiyel farkı oluşturulursa, levhalardan birisi artı diğeri de etkileşim ile eksi olarak yüklenir [34].

Şimdi bir levha kapasitör (iletken levhalar) alalım. Onu bataryaya bağlarız ve bunun sonucunda aynı miktarda fakat zıt işaretli yüklerle yükleriz. Her bir levhadaki meydana gelen serbest yükü Q (serbest) ve meydana gelen yüzey yük yoğunluğunu σ

(serbest) olarak isimlendireceğiz. Bu yükten dolayı kapasitörün içindeki elektrik alanı E (serbest) olarak isimlendireceğiz. Kapasitör yüklendikten sonra, levhalar arasındaki potansiyel farkını sağlayan bataryayı çıkaralım. Şimdi levhalarda yük “tuzaklanmış” olur. Levhalar arasına bir dielektrik sokalım, dielektrik üzerinde iki indüklenmiş yük tabakası oluşturur. Buna indüklenmiş yüzey yük yoğunluğu deriz; o, elektrik alan etkisiyle dielektriğin polarizasyonunun sonucudur. İndüklenmiş yük, “serbest yük”ün aksine, sıkça “bağlı yük” olarak adlandırılır.

İndüklenmiş yükler “kendi” elektrik alanını üretirler, ve üretilen bu elektrik alan dış elektrik alana karşı koyar.

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\epsilon_0} \quad (2.5)$$

olur, ve meydana gelen net alan,

$$E = E_s + E_i \quad (2.6)$$

Olur, böylece E 'nin büyüklüğü serbest elektrik alandan küçük olur. Normal şartlar altında $E_{ind} = -bE_{serbest}$ 'dir. Bunu yukarıdaki denklemde yerine yazarsak ,

$$E = (1 - b)E_s \quad (2.7)$$

Olarak bulunur burada $(1-b)$ sabiti $\frac{1}{\kappa}$ diye adlandırılır (dielektirik sabitidir ve sadece, levhalar arasına konan maddeye bağlıdır) böylece,

$$E = \frac{E_s}{\kappa} \quad (2.8)$$

olur. Başka bir şekilde ifade edersek,

$$\kappa = \frac{C}{C_0} = \frac{V_0}{V} \quad (2.9)$$

bağıntıdan görüldüğü gibi K boyutsuzdur, V_0 ve V ölçülerek K tayin edilebilir. Ayrıca $V_0 > V$ olduğundan, $K > 1$ olduğunu anlarız. Dielektrik sabiti K olan bir ortamın elektriksel geçirgenliği (ortamın permitivitesi) ϵ ve boşluğun elektrik geçirgenliği ϵ_0 ise, ortamın dielektrik sabiti,

$$\epsilon = \kappa \epsilon_0 \quad (2.10)$$

Olur. dır. K'nın değeri boşluk için $K = 1$ dir. Normal koşullardaki hava için, K değeri çok duyarlı olmayan hesaplamalarda 1 olarak alınabilir. Bir paralel levhali kondansatörün boşlukta veya havada levhaları arasındaki elektrik alan şiddeti, potansiyel farkı V_0 ise,

$$\epsilon_0 = \frac{V_0}{d} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.11)$$

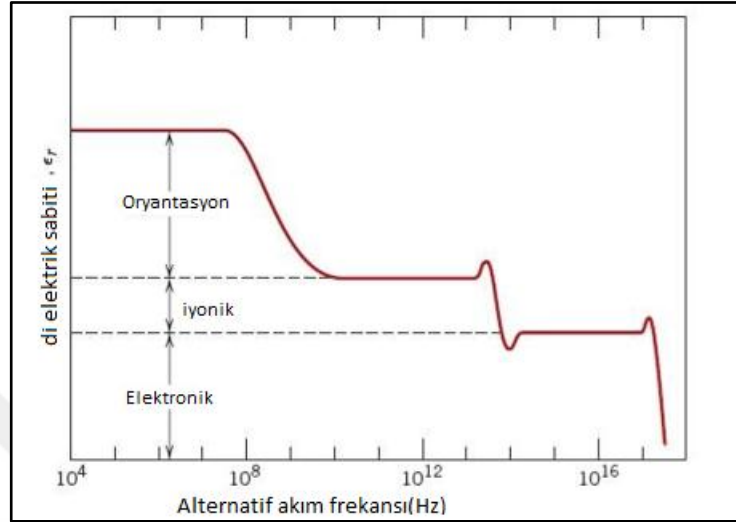
ile verilir. Kondansatörün levhaları arasında dielektrik madde varken, potansiyel farkı V ise elektrik alan şiddeti

$$E = \frac{V}{d} = \frac{\sigma}{\kappa \epsilon_0} \quad (2.12)$$

dır. bağıntılarından görüldüğü gibi, aynı paralel levhali kondansatörün levhaları arasına dielektrik madde konursa, bu durumdaki kondansatörün levhaları arasındaki elektrik alan şiddeti azalır. Daha açık olarak $E(\text{ilk}) < E(\text{son})$ olur. Araya koyulan yalıtkan maddelerin molekülleri dielektrik maddenin moleküllerini, var olan yapıya göre dipol momentlerinin (kutuplanmış n-tipi) elektrik alanla aynı doğrultuda sıraya girmesini sağlar. İşte yalıtkan malzemelerin moleküllerinin bu tür dizilmesinin nedeni ile bahsedilen alanla orantılı bir azalma oluşur.

Birde bizi ilgilendiren ferroelektirik malzemelerin kendiliğinden kutuplanma özelliği göstermesi vardır ki buna da yönelim kutuplanması denir. Daha önce çift kutup momentini elektirik alan etkidiğinde yön değiştirme becerisi olarak tarif etmiştik.

Frekansın artık saniyede kondansatörün uçları arasında oluşan yön değiştirme sayısı olduğunu biliyoruz. Frekansımıza bağlı olarak bir vakum ortamına kıyasla dielektirik sabiti nasıl değişir ondan bahsedelim.



şekil 2.3: Alternatif alan frekansının dielektirik sabitine etkisi.

Frekansımız düşükse, (60-70) gibi dielektirik sabitinin değişmediğini sabit kaldığını görüyoruz, fakat frekans artırıldığında bir yerden sonra dielektirik sabitinin düşerek farklı bir değerde sabitlendiğini görüyoruz. İlk düştüğü noktaya dikkat edersek 10^9 hz. gibi bir değer görürüz. Frekansı yükseltmeyi sürdürdüğümüzde 10^{14} hz. ve 10^{17} hz. gibi noktalarda dielektirik sabitinin yeniden düşüşe geçtiğini görürüz.

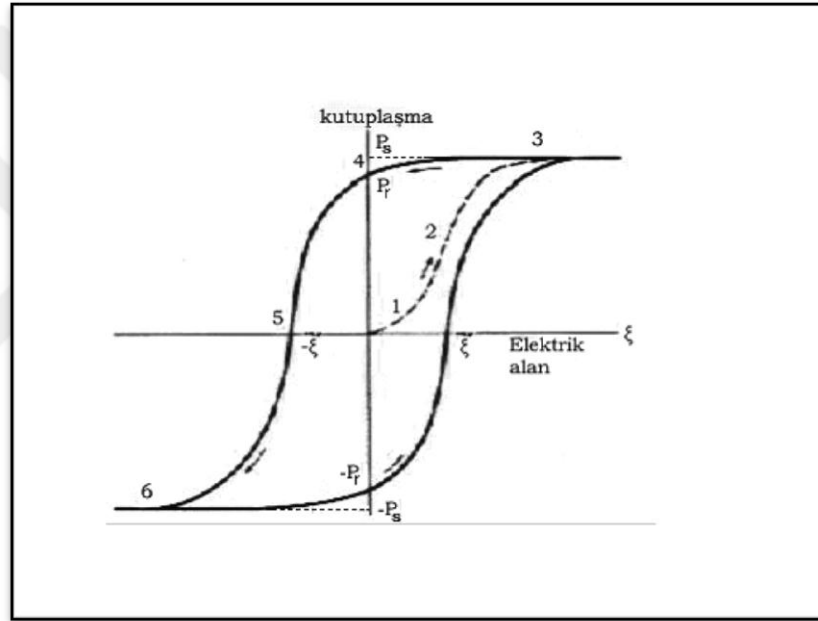
Bu şekilde üç basamak gözlenir son seviyedeki düşüş (10^{17})'den sonrası elektronik kutuplaşmadan dolayı olur (10^{14})'deki düşüş ise hem elektronik hemde iyonik kutuplaşmadan dolayıdır. En düşük frekans değerinde dielektirik sabitinin düşüşü ise yönelim kutuplanmasından dolayıdır.

2.1.2. Ferroelektrik Malzemeler

Ferroelektrik kavramı ilk defa 1921 yılında Rochelle tuzunun fiziksel özelliklerinin incelenmesiyle ortaya çıkmıştır. Dielektirik sabiti normalde 10 lar mertebesinde iken bu kristalde 10^6 'lara kadar çıkabilmektedir. Bu yıldan sonra KH_2PO_4 kristali ve başka bileşiklerde ferroelektrik yapının varlığı ispatlanmıştır. Bu

malzemelerin en büyük özelliği T currie sıcaklığı civarında fiziksel özelliklerinin büyük oranda değişim göstermesidir.

BaTiO₃ kristali 1945 yılına kadar bilinen tek basit yapılu kristaldi. Bu kristal hidrojen bağı içermemesi açısından ve bir çok izomorfik bileşik oluşturması açısından önem arz etmektedir. BaTiO₃ kristalinin birim hücresi $4 \times 10^{-8} \text{ cm}^3$, bu hücrenin dipol momentini $\mu \approx 5 \times 10^{-18} \text{ esu.cm}$ ve oda sıcaklığında kendiliğinden polarizasyonu $P_s \approx 8 \times 10^4 \text{ esu.cm}^{-2}$ dir. Ba⁺² ve Ti⁺⁴ iyonlarının oksijene göre 0.1 Å kadar yer değiştirmeleri ile $3 \times 10^{-18} \text{ esu.cm}$ kadar bir dipol moment verir.



Şekil 2.4: Ferroelektrik kristallerde polarizasyon-elektrik alan değişim grafiği.

Ferroelektrik malzeme kendiliğinden kutuplanma özelliğine sahiptir. Ferroelektrik malzemenin dipol momentinin elektrik alana göre grafiği histeris eğrisi olarak adlandırılır. Ayrıca ferroelektrik kristallerin özellikleri basınç ve sıcaklıkla değişebildiğinden, kristal yapısındaki değişiklikler bu geçişler esnasında gözlemlenebilmektedir

Kristal 1 durumunda net bir polarizasyona sahip değil ve dipol momentleri de rasgele yönlerde yönelmiş olsun. Bir dış elektrik alan uygulanırsa Şekil 2.2.1.'deki 1 durumundan 2 ve 3 durumuna ulaşıldığında dipol momentleri elektrik alan etkisiyle aynı yönde hizaya geleceklerdir. Böylece kutuplaşma 3.durumunda maksimum

olacaktır. Bu durumda dış elektrik alan kaldırıldığında kalıcı bir P_t kutuplaşması 4.durumda gözlenmektedir. Kalıcı bir kutuplaşmanın oluşması ferroelektrik kristallerin en önemli özelliklerindedir. Bu durumdan sonra zıt yönde bir elektrik alan uygulandığında kutup çiftleri zıt elektrik alan etkisiyle ters yönde yönelmeye başlayacaktır. 5.duruma gelindiğinde kutup çiftleri yine 1.durumda olduğu gibi rasgele yöneleceklerdir. Zıt elektrik alanın şiddeti artırıldığında 6.durumda 3.duruma zıt yönde net bir polarizasyon oluşacaktır.

Elektrik alan değişmeye devam ettiğinde, histeresis döngüsü ferroelektrik kutuplaşmanın alanla nasıl değiştiğini göstererek tarif eder. Histeresis döngüsünde kaplanan alan, bir yönden diğerine kutuplaşmanın kayması için gerekli enerji ile ilgilidir. Kutuplaşmanın kalıcı olması bilgisayar devresinde ferroelektrik malzemenin bilgiyi saklaması için malzemeyi kullanışlı hale getirir.

Kristaller kristalografik simetrilerine göre 32 nokta grubuna sınıflanabilir ve bu nokta grupları iki sınıfa ayrılabilir, simetri merkezli olan ve olmayan kristaller simetri merkezine sahip olmayan 21 nokta grubu vardır. Bunlar arasında 20 grup piezoelektriktir (basınç uygulandığında yüzeylerinde pozitif ve negatif yük merkezleri oluşur).

Piezoelektrikler arasında da 10 nokta grup, piroelektrik olarak adlandırılır. Piroelektrikler kendiliğinden polarizasyona sahip olan kristallere denir. Piroelektrik kristaller arasında kendiliğinden polarizasyonu elektrik alanla (kristalin kırılma limitini geçmeyen) çevrilebilenler ferroelektrikler diye adlandırılır. Ferroelektrikler için gerekli olan bir test, doğru büyüklükteki bir elektrik alan uygulandığında polarizasyon çevrimini deneysel olarak gözlemleyebilen testtir.

Kristallerde ferroelektrik özellikler genellikle sıcaklık veya basınçları değiştikçe bir kristal yapısından diğerine geçiş yapmaları sonucu gözlenebilir. Bir kristaldeki kararlı yapı, olabilecek tüm kristal yapıları arasında en düşük iç enerjiye sahip olanıdır. Herhangi A yapısından B yapısına geçiş olması için öyle bir T_c sıcaklığı olmalıdır ki; $F_A(T_c) = F_B(T_c)$ olsun. T_c ferroelektrik yapıda bulunan kristallerin alçak sıcaklıktaki polarize durumdan yüksek sıcaklıktaki polarize olmayan duruma geçişin olduğu sıcaklıktır. Bu sıcaklık noktası Curie-Weiss sıcaklığı olarak adlandırılır.

Yukarıda bahsettiğimiz bu faz geçişleritermodinamik Landau teorisi ile açıklanabilmektedir. Sıcaklığın düşmesi ile birlikte simetri değerleri daha yüksek

değerlerden daha alçak değerlere doğru düşerler. Kristaldeki faz geçişleri ya kendiliğinden kutuplanma yada kalıcı hasarlar neticesinde oluşur. Landou teorisindeki söz konusu etki termodinamik potansiyeli polarizasyonunun bir serisi olarak Taylor serisine açılır.

$$F=F_0 + \frac{\alpha}{2} P_s^2 + \frac{\beta}{4} P_s^4 + \frac{\gamma}{6} P_s^6 + \dots \quad (2.13)$$

Termodinamik potansiyeldeki α parametresi sıcaklığa $\alpha = \alpha_0(T - T_0)$ şeklinde bağlıdır. Buradaki α_0 , β , γ , katsayılarıdır ve sıcaklığa bağlıdır. Kristalin serbest enerjisi, $F(T,P)$, $P \rightarrow -P$ dönüşümü altında sabit kalması gerekliliğinden seri açılımı tek kuvvetli terimleri içermemelidir.

Soğutulan kristallerde atomlar yerdeğiştiriyor ve bu değişimler uzak ve bağımsız bir şekilde gerçekleşiyorsa, kutuplaşma işaretinden farklı alanlara bölünür. Domain (momentleri ayıran bölge) davranışından bahsetmemiz için faz geçişleri olması gerekir. Domain duvarları uzaysal olarak genişletilmiş bölgelerdir. uygulanan elektrik alan altında domen duvarları kaybolur ve monodomen haline gelir bunun sonucunda histerisis eğrisi görülmeye başlar.

Ferroelektrik yapısal faz geçişlerinde kaybolan simetri elemanları domain yapısında polarizasyon yönelimleri olarak tekrarlanmaktadır. Kaybolan simetri elemanları düzen parametresinin yönelimlerinden belirlenebilir. Ferroelektrik fazda meydana gelen domen duvarlarının tiplerini kristalin ferroelektrik ve antiferroelektrik fazlarının simetrisine bağlıdır. $Pb(Zr,Ti)O_3$ (kurşun zirkonyum titanat) rombohedralinde polarizasyon kübik paraelektrik fazın cisim köşegeni boyunca oluşur. Kendiliğinden polarizasyon vektörlerinin yönelimlerini ayıran domen duvarları ferroelektrik domen duvarları olarak isimlendirilirken kendiliğinden bir gerilim tensörünün yönelimini ayıran duvarlara ise ferroelastik domen duvarı denir. Böylece, bir ferroelektrik kristaldeki domen duvarlarının tipi tamamen kristalin simetrisine bağlıdır.

2.3. Manyetik Malzemeler

2.3.1. Diyamanyetik ve Paramanyetik Malzemeler

Belli bir manyetik momente sahip olmasına göre manyetik alana tepki veren, manyetik alınganlığı sıfırdan küçük yani negatif olan maddelere diyamanyetik madde denir. Dışarıdan verilen, sağlanan manyetik alan ortadan kalktığında alana verilen tepkide ortadan kalkar. Alınganlıkları negatif olduğundan uygulanan alana ters bir tepki gösterirler. Paul Langevin 1905 yılında ilk defa klasik diyamanyetik teoriyi ağıklamıştır.

Langevine göre elektronun yörüngesine etkiyen manyetik alan etkin akımı düşürmektedir. Bu alana zıt yönde bir manyetik moment oluşturur. Bu etki diğer atomlardan bağımsızdır ve toplam elektronların momentidir.

Diyamanyetik bir malzemeye dışarıdan bir alan uygulanırsa, diyamanyetik malzemeler uygulanan alana zıt bir mıknatıslanma (M) oluştururlar.

Paramanyetik malzemeler, diyamanyetik malzemelerin aksine her bir atom net manyetik momente sahiptir, fakat bu manyetik momentler örgü iğerisinde rastgele dağılım gösterdiklerinden dolayı net bir mıknatıslanma oluşmaz. Ancak dış bir manyetik alan uygulandığında bu manyetik momentler alan yönünde dönerek mıknatıslanma oluştururlar. Alan kaldırıldığında ise tekrar düzensiz hale geğerler.

Paramanyetik bir malzemenin dışarıdan uygulanan bir alana nasıl tepki verdikleri şu şekildedir, dış manyetik alan arttığa mıknatıslanma değer de artar. Bu durum, uygulanan alan ile birlikte manyetik momentler alan yönünde dönmeye başlayıp bir düzen oluşturduğunu göstermektedir.

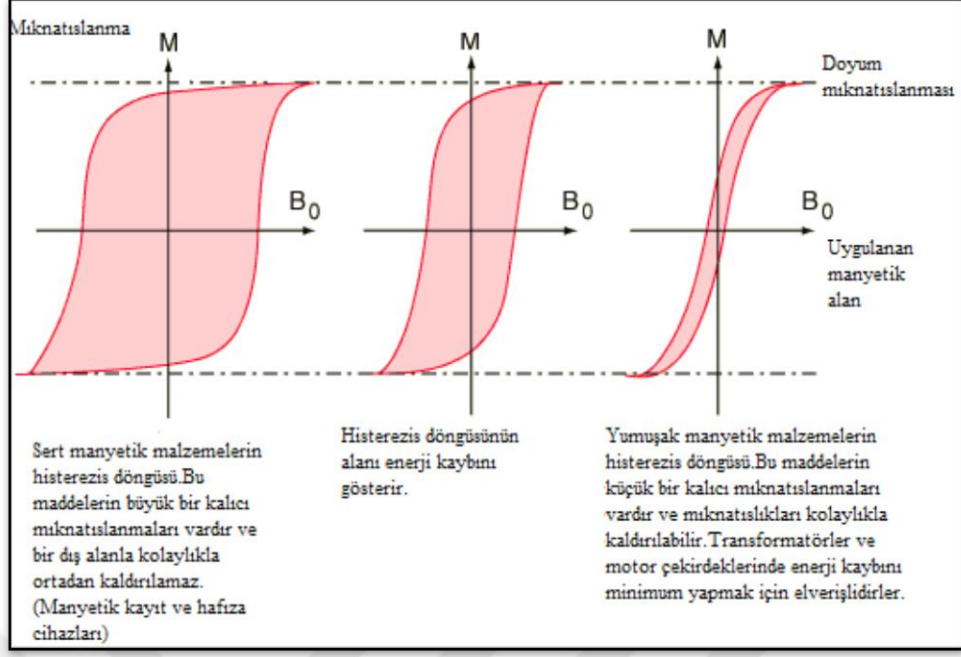
Düşük ve yüksek sıcaklık aralığında duygunluk ölçümleri ilk defa Currie tarafından yapılmıştır kütle duygunluğunun sıcaklıkla ter orantılı olduğunu gösteren ifade aşağıdaki gibidir.

$$\chi = \frac{C}{T} \quad (2.14)$$

2.3.2. Ferromanyetik Malzemeler

Atomları sürekli manyetik momente sahip olan az sayıda kristal yapılı maddeler, ferromanyetizma denen kuvvetli manyetik olay gösterirler. Ferromanyetik maddelerin bazı örnekleri demir, nikel, kobalt, gadolinyum ve disprosyumdur. Bu tür maddeler zayıf bir dış manyetik alan içinde bile birbirlerine paralel olarak yönelmeye çalışan atomik manyetik dipol momentler içerirler. Momentler bir kere paralel hale getirildikten sonra, dış alan ortadan kaldırılrsa bile madde mıknatıslanmış olarak kalır. Bu sürekli yönelim, komşu olan manyetik momentler arasında kuvvetli bir etkileşimden kaynaklanır. Bu etkileşim, ancak kuantum mekaniksel ifadelerle anlaşılır.

Tüm ferromanyetik maddeler 'domain' denen mikroskobik bölgelerden oluşurlar. Herhangi bir bölgedeki momentlerin hepsi aynı yöne yönelmiştir. Bu bölgelerin hacimleri yaklaşık 10^{-12} - $10^{-8} m^3$ olup 10^{17} - 10^{21} civarında tane atom içerir. Farklı yönelimlere sahip olan bölgelerin arasındaki sınırlara bölge duvarı denir. Mıknatıslanmamış bir numunede bu bölgeler rastgele fakat net manyetik moment sıfır olacak şekilde yönelirler. Numune dış bir manyetik alan içine konduğu zaman, bölgeler hafifçe dönerek manyetik alan yönünde yönelmeye çalışırlar. Bu yönelme olayı, mıknatıslanmış bir numune ortaya çıkarır. Gözlemler, dış manyetik alan uygulanınca başlangıçta dış manyetik alan yönünde yönelmiş olan bölgelerin diğer yönlere yönelmiş olanların aleyhine büyüyeceğini göstermektedir. Dış alan ortadan kaldırıldığı zaman, numune kalkan alanın yönünde net bir mıknatıslanmayı koruyabilir. Normal sıcaklıklarda, ısısal uyarımlar manyetik momentlerin bu tercihini bozacak kadar etkili değildir.



Şekil 2.5: Ferromanyetik bir maddenin mıknatıslanma ya da histerisis eğrisi.

Dış alan ortamdaki kaldırıldığında, mıknatıslanma eğrisi denem B' 'nin H ile değişim eğrisi, resimdeki ab yolunu izler; b noktasında dış alan B_0 sıfır olduğu halde, B alanının sıfır olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni, çok sayıda bölgenin paralel hale geçmelerinden ötürü, şimdi demir çekirdeklerinin mıknatıslanmış olmasıdır. Bu durum da şunu söyleyebiliriz ki demir kalıcı mıknatıslanmaya sahiptir. Bir de birincil akımın yönü değiştirilerek dış alanın yönü değiştirilip şiddet artırılırsa, numune c noktasına, tekrar mıknatıslanmamış duruma geçinceye kadar bölgeler yön değiştirir, burada b sıfır olur. Ters yönlü akımdaki daha fazla artış demirin ters yönde mıknatıslanmasına neden olur ve bu sefer d noktasında doyuma ulaşır. Akım tekrar sıfıra düşürülür ve sonra başlangıçta pozitif diyebileceğimiz yönde arttırılırsa, benzer olaylar zinciri tekrarlanır ve akım def yolunu izler. Akım yeterince arttırılırsa mıknatıslanma eğrisi a noktasına geri döner ve orada numune yine maksimum mıknatıslanma değerine kavuşur.

İşte bahsettiğimiz bu olaya manyetik histerisis denir. Manyetik histerisis ferromanyetik bir maddenin mıknatıslanmasının uygulanan alanın şiddetine ve geçmişteki durumuna bağlı olduğunu gösterir (hysteresis kelimesinin anlamı geride kalıştır). Çoğu kez ferromanyetik bir malzemenin hafızaya sahip olduğu söylenir. Çünkü bahsettiğimiz gibi dış alan ortadan kalktıktan sonra bile bu histerisis madde mıknatıslanmış olarak kalır. Bu histerisis eğrisinin şekli ve büyüklüğü ferromanyetik

maddenin özelliklerine ve uygulanan maksimum alanın şiddetine bağlıdır. Sert ferromanyetik maddelerde geniş (bunun anlamı büyük bir kalıcı mıknatıslanmaya sahip olmasıdır), demir gibi yumuşak bir maddenin hysterezis eğrisi ise dardır ve bunun anlamı görece olarak daha zayıf bir mıknatıslanmaya sahip olması ve daha kolay ortadan kaldırılabilmesidir.

2.4. Multiferroik Malzemeler ve Manyetoelektrik Etki

En genel formal şekli ile manyetoelektrik etki (ME), ortamdaki elektriksel ve manyetik alanlar arasındaki etkileşimi (coupling) ifade eder. Bu durumda ME etkiye elektriksel ve manyetik sistemlerin katkısı malzemenin serbest enerji serisinden belirlenebilir [5]

$$F(\mathbf{E}, \mathbf{H}) = F_0 - P_i^s - M_i^s H_i - \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_{ij} E_i E_j - \frac{1}{2} \mu_0 \mu_{ij} H_i H_j - \alpha_{ij} E_i H_j - \frac{1}{2} \beta_{ijk} E_i H_j H_k - \frac{1}{2} \gamma_{ijk} H_i E_j E_k - \dots \quad (2.15)$$

manyetik alan bileşenine göre türevi ise mıknatıslanmayı belirler:

$$M_i(\mathbf{E}, \mathbf{H}) = - \frac{\partial F}{\partial H_i} = \quad (2.16)$$

$$= M_i^s + \mu_0 \mu_{ij} E_j + \alpha_{ij} E_j + \beta_{ijk} E_j^i H_k + \frac{1}{2} \gamma_{ijk} E_j E_k + \dots$$

burada P_i^s ve M_i^s kendiliğinden kutuplaşma ve mıknatıslanma, ε ve μ ise dielektrik ve manyetik duygunluklardır. α tansörü manyetik alan etkisi ile elektriksel kutuplaşmanın, ve aynı zamanda elektriksel alan etkisi ile mıknatıslanmanın değişim oranını gösteren katsayıdır ve böylece, manyetoelektrik katsayı adlandırılır. İfadelerden de görüldüğü gibi, daha yüksek dereceli ME etkiler β ve γ katsayıları ile tanımlanır. Genelde tüm araştırmalar α lineer ME katsayısı üzerine yoğunlaşmıştır ve çok zaman “lineer” tabiri de kullanılmadan ME etki terimi denildikçe lineer etki kastediliyor.

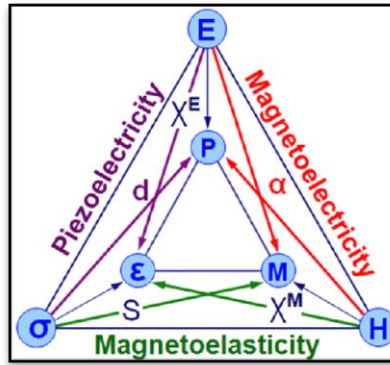
Genel olarak, ME etkisi boyut olarak aşağıdaki koşulla sınırlıdır

$$\alpha_{ij}^2 < \epsilon_{ii} \mu_{jj} \quad (2.17)$$

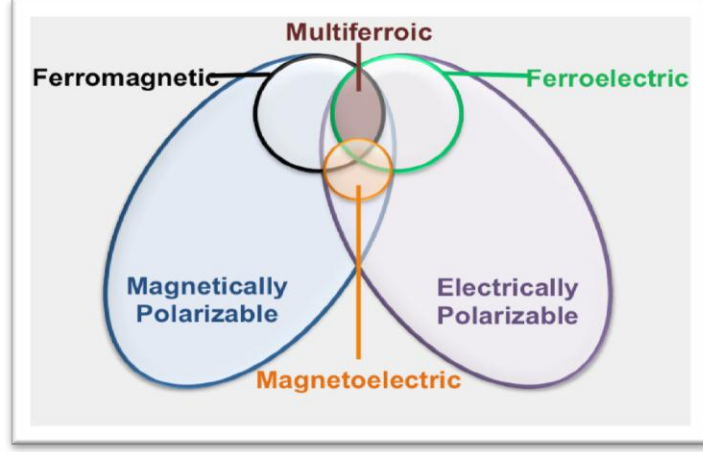
Böylece, bu etkinin en yüksek derecede görüleceği ortam, duygunlukların yüksek olduğu ferroelektrik ve ferromanyetik düzenlerin bir arada bulunduğu malzemeler olacaktır, böyle malzemelere de multiferroikler denir.

60'lı yılların başından multiferroik kristallerin yoğun şekilde incelenmesine rağmen, pratik uygulamalar için multiferroik tek kristal yapıları malzemelerin seçimi çok sınırlı olmuştur. Çok az sayıda malzeme oda sıcaklığında böyle özelliklere sahip olmuştur. Aynı zamanda, hemen-hemen tüm malzemelerde bu etkinin uygulamaları için çok zayıftır [7]. Bunun nedeni Hill tarafından izah edilmiştir [8]. Hill'in belirttiği gibi, ferroelektrik düzenlenmeyi ve polarizasyonu oluşturan iyonların merkezden kayma özelliği kısmen dolmuş d seviyesine sahip iyonlar için geçersizdir, halbuki, sözü edilen bu özellik magnetik düzenlemenin oluşumu için şarttır.

Ancak, daha sonra araştırmacılar ME etkiler gösterecek yapay ferroelektrik ve ferromagnetik heteroyapıların üretilebileceğini gösterdiler [9]. Böyle yapılarda en önemli olgu, magnetik ve elektrik özellikleri bir birine bağlayan başka bir aracı etkinin olmasıdır. Güçlü ME etkisinin, güçlü magnetostriksiyon ve piezoelektrik özelliklere sahip ferromagnetik ve ferroelektrik elemanlardan oluşan kompozit yapılarda mevcut olduğu görülmüştür [10].



Şekil 2.6: Magneto elektrik etkinin bileşenleri.



Şekil 2.7: Multiferroikler ve manyetoelektrikler arasındaki ilişki.

Böyle yapılarda ME etki magnetostriktif (magneto-sıkışkan) ve piezoelektrik elemanlar arasında esnek etkileşim aracılığı ile gerçekleşiyor. Genel olarak, böylece magnetoelektrik etkileşimin bileşenleri (komponentleri) Şekil 2.3.2.1.'deki gibi gösterilebilir. Elektriksel ve manyetik etkiler arasındaki etkileşmeye bir de esnek özellikler eklenmiş oluyor. Bunun da sonucunda farklı nitelikli (ferroelektrik ve ferromanyetik) malzemeler arasındaki etkileşim, piyezoelektrik ve magnetostriksiyon etkileri ve onların sonucu ortaya çıkan deformasyon aracılığı ile gerçekleşir. Böylece, Van Suchtelen ve arkadaşları böyle özelliklere sahip olan ve ferroelektrik (piezoelektrik) $BaTiO_3$ malzemesi ile ferromagnetik (piezomagnetik) $CoFe_2O_4$ (CFO) malzemesini bir arada bulunduran kompozit yapı geliştirmişler [11], [12], [13], [14]. Bundan sonraki araştırmalar ferrit - $PbZrTiO_3 / BaTiO_3$ kompozitler üzerinde yoğunlaşmıştır[15],[16] yalnız, deneyde görülen etki oranı (verimi) teoride öngörülen değerlerin %1–%2 oranında kalmaktadır [30] .

Aynı zamanda literatürde $(PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ (PZT)– $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92}$ (Terfenol-D), PZT– $NiFeO_4$, polyvinylidene fluoride–Terfenol-D ve laminate $PbMgNbO - PbTiO - Terfenol-D$. (PZT- $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.92}$ (Terfenol-D), polyvinylidene fluoride–Terfenol-D and $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3 - PbTiO_3 - Terfenol-D$) katmanlı kompozitlerde ME etki hakkında bilgiler vardır[17],[18].

Daha sonraki araştırma ve geliştirmeler daha yüksek verimli yapıların elde edilmesi ve aynı zamanda mevcut yapıların aynı amaçlar için geliştirilmesi yönünde olmuştur. Genellikle, magnetostriktif-piezoelektrik laminat kompozitlerde ME katsayıların tek-fazlı ve parçacıklı kompozit malzemelerdekenden daha yüksek

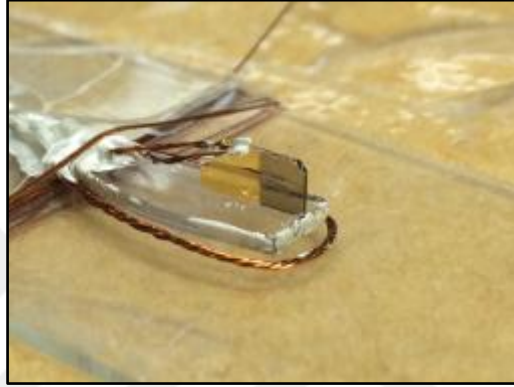
olduğu görülmüştür [17,19-22].

Genellikle magnetoelektrik etki ferroelektrik ve magnetic malzemelerin heteroyapılarının birleştirilmesi ile elde ediliyor. Belirli özelliklere sahip heterostrukturların gerçekleştirilmesi sadece zor olmakla kalmayıp aynı zamanda uzun süreli ve çok aşamalı işlemler gerektiriyor. Bu nedenle özellikle son zamanlarda yapay katmanların yapımı ve onların multiferroik özelliklerinin geliştirilmesi yönünde araştırmalar hızlanmıştır. Bu malzemeler tek kristal, kompozit, süperörgü ve ya çok katmanlı yapılar şeklinde yapılandırılıyor[23], [24], [25], [26]. Süperörgü yapılar alternatif ferroelektrik ve ferromagnetik tabakalardan oluşuyor ki, bunlardaki alt örgülerin herhangi birinde bağımsız olarak bu özelliklerin birlikteliği gözlenmemiştir.

Bu arada süperörgü yapılar diğerlerinden farklı olarak ferroelektrik ve ferromanyetik malzemeleri bir arada bulundurmazlar, bu malzemeler katman katman ayrı olarak bulunurlar. Katmanlı yapıların bu şekilde incelenmesi ve geliştirilmesi manyetoelektrik etkinin daha pratik bir durumuna gelmesine olanak sağlar. Ancak aynı zamanda onu da kaydetmek gerekiyor ki, katmanlı yapıların etkinliği boyut açısından sınırlanmış durumdadır ve miniyatürize edilmelerinde zorluklar çıkıyor. Bu nedenle magnetoelektrik kompozit yapıların incelemesinde ilerlemelerin devamına ihtiyaç duyulmaktadır. Bundan sonraki araştırmalar hep daha verimli yapılar oluşturmak üzere olmuştur ve genellikle ferroelektrik ve ferromanyetik yapıların bir arada olduğu kompozit yapılar tercih edilmiştir. Yani anlaşılacağı üzere manyetoelektrik etki ferroelektrik ve ferromanyetik malzemelerin birleşmesi ile oluşturuluyor. Bu şekilde oluşturulan hetero yapıların gerçekleşmesi uzun ve maliyetli işlemler süreci gerektiriyor. Bu yüzden son zamanlarda yapay katmanlardan oluşan multiferroik özelliklerin gelişmesi yönünde çalışmalar hız kazanmıştır.(tek kristal, süperörgü, kompozit veya çok katmanlı)

3. DENEYSEL TEKNİKLER

Bu bölümde, satın alınan Co katkılı kompozit BaTiO₃ kristallerinin elde edilmesi için uygulanan deneysel teknikler incelenecektir. İyon demeti saçılmalı çöktürme (ion beam sputtering deposition - IBSD) yöntemi ile BaTiO₃ üzerinde 300 nm kalınlıklı BaTiO₃:Co kompozit ince filmler üretilmiştir. Bu filmler üretim sürecinin sonunda 750°C sıcaklık ve 10⁻⁶ Torr basınçlı vakum ortamında tutulmuştur.



Şekil 3.1: Co katkılı kompozit BaTiO₃ kristal.

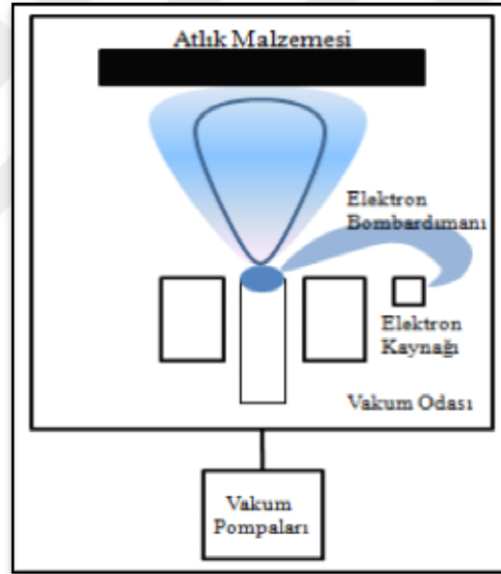
Statik mıknatıslanma ölçümleri Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümünde bulunan VSM Magnetometre (*PPMS, Quantum Design Corp.*) cihazı ile 10–400 K sıcaklık aralığında düzlemsel ve dik düzlemsel doğrultularda gerçekleştirilmiştir. Mıknatıslanmanın sıcaklık değişimi sıfır alan soğutmalı (zero field cooled - ZFC) ve alan soğutmalı (field cooled - FC) rejimlerde ölçülmüştür.

Manyetik rezonans ölçümleri yine Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Bölümünde bulunan *Bruker EMX* modeli X-bant (9.8 GHz) spektrometresi kullanılmakla oda sıcaklığında ve uygulanan sabit manyetik alanın örnek düzlemlerine göre farklı yönelimlerinde (paralel ve dik) gerçekleştirilmiştir.

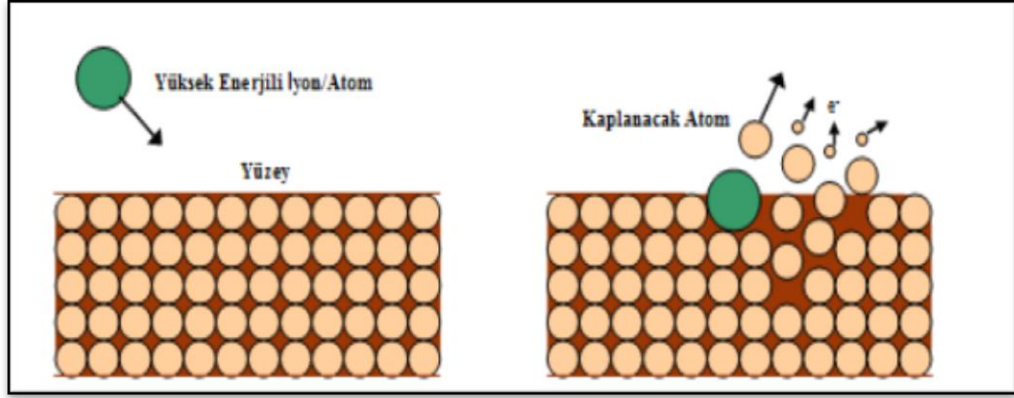
Örneklerin yapısal ve manyetik karakterizasyonlarını belirlediğimiz deneysel teknikler ile ilgili bilgiler verilecektir. Numuneler İyon demeti püskürtme yöntemi tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Öncelikle 0,4 mm kalınlığındaki numunemiz 750 derece vakum ortamında 30 derecede hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin yapısal ve kalınlık analizi X-ışınları yansıması tekniği ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) kullanılarak yapılmıştır.

3.1.İyon Demeti Püskürtme Yöntemi (İon Beam Sputtering)

Bu yöntem, malzememiz üst yüzeyinin, plazma veya iyon tabancası ile ş atomik boyuttaki yüksek enerjili gaz iyonlarını hızlandırarak bombardıman etmek suretiyle, kaplamak istediğimiz malzemeyi yüzeyden koparılması ve buhar olarak altlık malzemeyen ılaştırılması esasına dayanır. Bu yöntem ilk kez 1852 yılında Grove tarafından gözlemlenmiştir. Gaz deşarjı içinde tübün katotundan enerjisi yüksek yüklü parçacıklar bahsedilen tüpün yüzeyine biriktirilmiştir. Bugün sıçratma genelde temizlik amaçlı, aşındırmada, film üzerine malzeme biriktirmede ve analiz metodu olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.1.1.'deki yöntemde soygaz iyonları, malzemeye çarpıp enerjilerini aktarırlar. Böylece malzeme yüzeyinden atomları sıçratırlar [37].



Şekil 3.2: elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi.



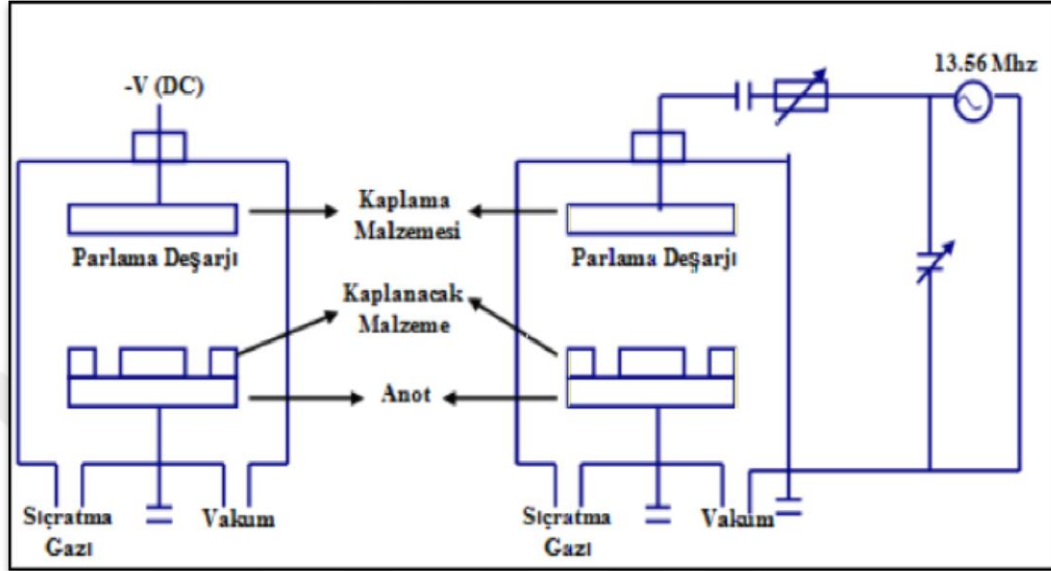
Şekil 3.3: Sıçratma mekanizması.

Sıçratma tekniği ile birçok malzeme başarılı bir şekilde kaplanabilmektedir. Ayrıca farkı enerji aktarabilme özelliği sayesinde farkı alaşımlar elde edilebilmektedir , ve bu alaşımlar ile yapılan kaplamaların, elektronik, optik, türbin teknolojisindeki gelişmelerde büyük payı vardır. Bunun nedeni, manyetik alanda sıçratma yöntemi yönteminin en önemli avantajı farklı buhar basınçlarında yükselmesi sistemin kullanımını sınırlamıştır. Son yıllardaki gelişmeler sayesinde bu yöntemle film içine mikro olmayan yapıların girmesi çok zordur. Elde edilen malzemenin kaplanacak malzemeye yapışması çok iyidir, ayrıca bu yöntemin temizlemede kullanıldığı göz ardı edilmemelidir. Yani elde edilen filmin yapısı ve kalitesi çok iyidir.

Fakat bu yöntemin dezavantajları da vardır, kaplama kalınlığı belli bir ölçüye kadardır ve maddi olarak yüksek maliyetli olabilmektedir. Temel olarak sıçratma yöntemleri FBB kaplamaları diyot, triyot, manyetik alan altında sıçratma ve iyon demeti ile sıçratma olarak sınıflandırılmaktadır.

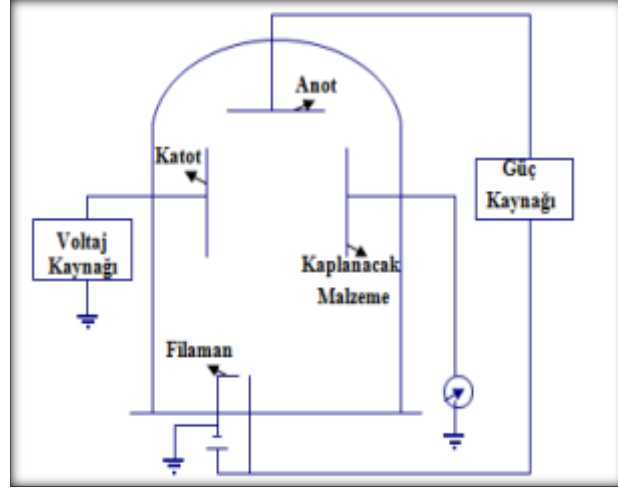
Şekil 3.1.3.'de şeması görülen diyot sıçratma sisteminde, biri artı diğeri eksi olarak yerleştirilmiş düzenek vardır. Malzememizi eksi yüklü tarfa yerleştiririz. Vakum sonucunda sıçratma mekanizması 13.3 Pa (10⁻¹ torr) olacak ayarlanır, levhalar arasına 1000-5000 kV luk gerilim ve 1-10 kΩ luk direnç uygulandığında, parlama deşarjı (glow discharge) oluşmaktadır. Bu noktadan sonra elektronlar artı yük tarafına sıçramakta ve buradanda kaplamak itediğimiz malzemeyi koparmaktadır. Burada iletken bir kaplama malzemesi söz konusuysa söz konusu deşarjı oluşturmak için doğru akım (DC, direct current) uygulanmalıdır. Eğer söz konusu malzeme yalıtkan ise deşarjın oluşabilmesi için bahsi geçen voltaj yerine radyo frekans (RF, radio frequency) voltajı kullanılmaktadır. Bu sistemede radyo frekans (RF) diyot

sıçratma denir. Bu yöntem kolay olması yanında düşük malüyetlidirde, fakat düşük biriktirme hızı, yüksek enerjili maddelerin kaplanmasında malzemenin fazla ısınması ve biriktirme alınının yetersizliği gibi dezavantajları vardır.



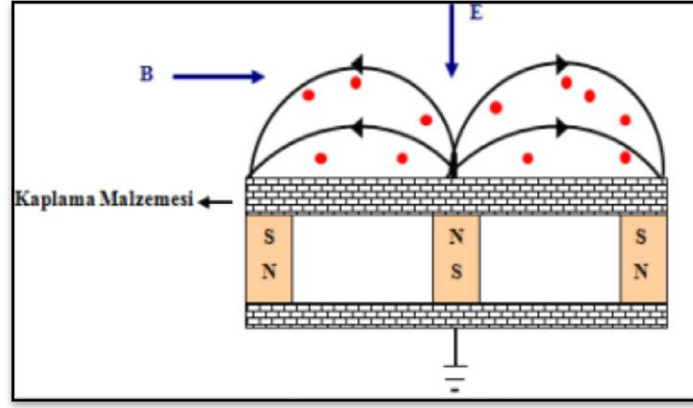
Şekil 3.4: Diyot sıçratma yöntemi.

Triyod sıçratma sisteminde alçak basınçlardada yionlaşmayı sağlamak için ve deşejm devamlılığını sağlamak için sisteme ek bir ısıtıcı ve artı yüklü bir levha konulur. Bu ilaveler sayesinde, söz konusu gaz daha fazla iyonlaşacak düzeneğin verimini yükselecektir. Artı ve eksi yüklü levhalarımızın özelliği, potansiyelinin oluşacak gaz iyonlarının potansiyeli mertebesinde oluşudur. Bahsettiğimiz bu koşullar olanbildiğince homojen bir plazma elde etmemizi sağlar. Sıklıkla kullanılan sistem. Şekil.3.3 "de görülen sıcak katot triyot (hot cathode triode) sistemdir. Artı yüklü levhanın olduğu taraf termodinamik emilim süresince elektron yayımı sağlar buda daha önce bahsettiğimiz deşarj sistemi içine atımı sağlamaktadır. Bu durum iyonizasyon veriminide arttırmaktadır. Deşarjı sistemi düşük basınçlarda ($6.6-0.13 \text{ Pa} / 5.10^{-2} -10^{-3} \text{ torr}$) ve alçak voltaj değerleri (50-100V) uygulanarak oluşmaktadır. İşte bu nedenle bu sistemin hızı (bir kaç yüz nm/dak) diğer yöntemlerin hızına göre daha yüksektir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı işlem sırasında flaman ömrünün kısalığıdır.



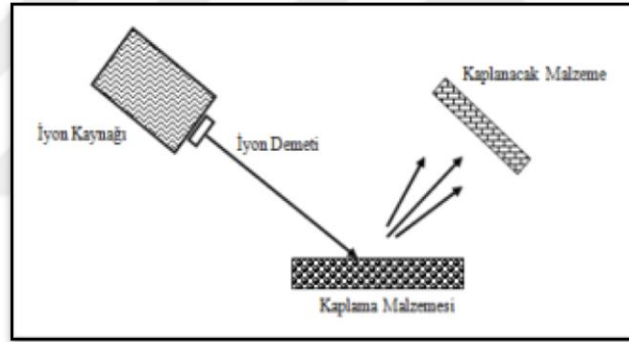
Şekil 3.5: Triyod sıçratma sistemi.

Bir diğer yöntemde Manyetik alan sıçratma yöntemidir. Kaplanacak madde, su soğutmalı mıknatıs veya elektromıknatıslardan oluşan düzeneğe konumlandırılmıştır. Kaplanacak maddemizin merkezine mıknatısın bir kutbu, maddemizin kenarında diğer kutbu yerleştirilmiştir. Bu düzenek sayesinde manyetik ve elektrik alan birbirine dik olabilmektedir. Burada önemli bir unsurda oluşan elektronlar hem manyetik alana hem elektrik alana diktir. Elektronların bu dik hareket mekanizması, kaplanacak maddemizin yüzey alanına paraleldir ve kapalı halka oluşturur. Dikkat edilmesi gereken bir diğer unsurda kaplanacak malzememizin yüzeyindeki aşınmaların manyetik alan çizgileri doğrultusunda olmalarıdır. Bu yöntemle söz konusu elektronlar daha küçük alan üzerine yönlendirilir ve çarpışmalar artı yüklü levhanın yüzeyine yakın yerlerde oluşur. Yani bu sayede iyonizasyon yoğunluğu artar ve daha yoğun bir sıçratma gerçekleşir. Bunun sonucunda çalışabileceğimiz ortamın basınç koşulları daha esnek bir hale gelir. Bu esnek koşullar, yani düşük basınç altında çalışabilme olanağı, şunu sağlar ki sıçratılan maddenin gaz halindeki saçılması az olur ve kaplamak istediğimiz maddeye daha fazla tanecik ulaşır. Buda daha verimli bir kaplama yöntemi demektir. Sonuçta elektronların etkin kullanılması ile düşük basınçta ($0.13-0.39 \text{ Pa}$ / $1 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-3} \text{ torr}$) ve düşük voltajda (300-700V) kaplama yapılabilmektedir.



Şekil 3.6: Manyetik sıçratma mekanizması.

Son olarak başka bir sıçratma mekanizmasında iyon demeti tekniğidir. Daha yüksek basınç altında çalışma olanağı veren bu teknik, buna bağlı olarak başka bir iyon kaynağı tarafından desteklenmeye ihtiyaç duyar.



Şekil 3.7: İyon demeti sıçratma.

En çok kullanılan iyon kaynakları “Kaufman kaynağı” ve “Duoplasmatron”dır. Eski bir iyon kaynağı olan Duoplasma kullanılan ark deşarjı oluşmasını sağlar, bilinen en eski kaynaktır. Günümüzde Kaufman iyon kaynağı kullanılmaktadır. Artı yüklü sıcak bir flama sahip Kaufman kaynağında plazma oluşturularak iyonlar elde edilmektedir. Alçak sıcaklık değerlerinde bile iyi bir tutunma sağlayan iyon demeti ile sıçratma yöntemin dezavantajları düşük basınç ortamlarında çalışma olanağı olmaması, iyon demetinin çapının (~1 cm) dolaylarında olması ve buna bağlı olarak madde üzerine biriktirme hızının düşük olmasıdır. Ayrıca kaplanacak malzeme büyük alanlara sahipse, homojen kalınlıkta bir kaplama yapılamamaktadır.

Sonuç olarak iyon demeti sıçratma yönteminde;Hedefi bombardıman enerjisi, kinetik enerjisi, iyi bilinen bir iyon demetiyle dövülerek iyi bir biriktirme işlemi yapılabilir. Plazma yoğunluğu ve enerji bağımsız olarak seçilebilir ve yüksek vakum şartlarından dolayı biriktiren malzeme kopartma yöntemine göre daha temiz elde edilebilmektedir. Bu yöntem karmaşıklığı ve geniş alan plazma kaynaklarının kısa anlar için elde edilmesinden dolayı sensör teknolojisinde henüz yerini almamıştır. Buharlaştırma, kopartma ve iyon demetiyle biriktirme yöntemlerinin birleşmiş şeklidir. Bir maden eritme potası termal olarak ısıtılıp,metal buharının genişletilmesi yoluyla,sadece tek atomla değil ,atom grupları kaynaktan vakum ortamına yayılır. Bu gruplar bir plazma bölgesinde iyonlaştırılıp belli enerji ve gerilime gönderilerek istenen tabakanın oluşumu sağlanır [27,28].

3.2. X-ışınları Kırınım Yöntemi

Genel olarak örneğimize x ışını göndererek kırılma ve dağılma verilerini toplar ve analiz ederiz. Bunu lise müfredatındaki kırılma indisi ve açı soruları gibi düşünebiliriz, değişik açı ve büyüklükte kırılan ışınlar kristale göre değişik ve çok hasas biçimde yorumlanabilmektedir. Sağ ve sol başlıklar ile dedektör birbirlerine v şeklinde bağlanmıştır. İşte bu v şeklindeki açı değiştirilmekte ve orta bölümdeki hazne örnek yüklemesi için kullanılmaktadır. Fourier Transform devriminden sonra XRD aletleri çok hassas ölçümlere olanak vermektedir. XRD çok kullanışlıdır çünkü parmak izi hassaslığında ve çok geniş bir spektrumda ölçüm yapabilmektedir.

Burada biraz bragg yasasından bahsetmemiz gerekiyor, X ışınlarının tanımlanmasında ve kristal yapıların analizinde önemli bir yer tutmaktadır. Bragg kırınımını anlamamız için gözümüze nizami olarak dizilmiş paralel düzlemler getirmeliyiz. Atomların içinde periyodik olarak sıralandığını düşünerek düzlemlerin çok farklı eksenlerde olduğu unutulmamalıdır. İşte bu düzlemlere belirli bir β açısıyla gelen elektromanyetik dalga olduğunu varsayalım. Bahsedilen elektromanyetik dalga kristale çarpar ve bir kısmı yansır, yansıyan bu dalgaların aynı fazda olduğu doğrultuda kırınımın maksimumları gözlenecektir. Bildiğimiz yansıma kuralıyla $\beta = \beta'$ Sonra, aralarında d uzaklığı olan ardışık iki düzlemdeki atomlarda saçılan dalgaları göz önüne alalım. İki dalga arasındaki yol farkı

$$2d \sin\beta \quad (3.1)$$

olur.

Ardışık iki düzlemden kırınan dalgaların aynı fazda olabilmesi için yol farkı λ dalga boyunun tam katları olmalıdır:

$$2d \sin\beta = n\lambda \quad (3.2)$$

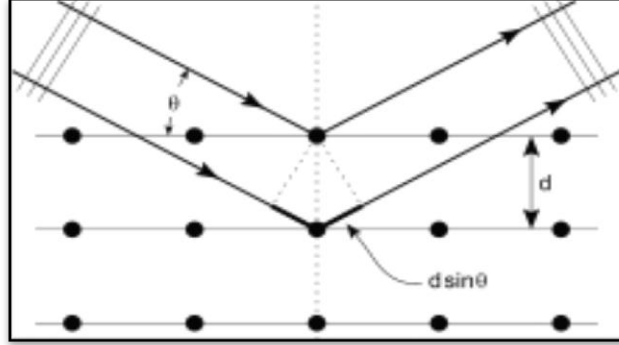
Buradan $n = 1, 2, 3, \dots$ tam sayısı kırınım maksimumunun derecesi olur. Çoğu deneylerde $n > 1$ olan maksimumlar çok zayıftır ve sadece $n = 1$ önemli olur.

$$2d \sin\beta = n\lambda \quad (3.3)$$

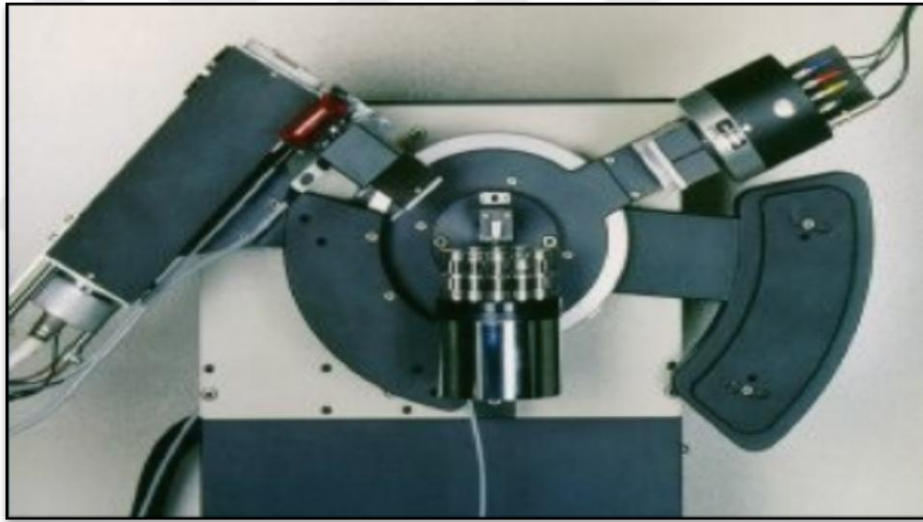
bağıntısına Bragg yasası denir.

Denklemlerin sağlandığı her doğrultudan kristal atomlarından kırınan dalgalar aynı fazda olacak ve kuvvetli bir maksimum gözlenecektir, bu netice çok kullanışlıdır. Bazı basit kristal yapıları için kristal yoğunluğu ve atom ağırlığı kullanılarak, d uzaklığıda hesaplanabilir. Düzlemler arası uzaklık bilinen kristaller üzerine tek renkli X ışını gönderildiğinde, oluşan saçaklar incelenir ve neticede dalga boyu bulunur. Şayet X ışını dalga boyu sürekli bir spektrumda varlık gösteriyorsa, farklı dalga boyları farklı doğrultularda maksimum verecektir; bu durumda kristal yardımıyla, X ışınında hangi dalga boylarının hangi şiddetlerde bulunduğu araştırılabilir. Kolimatör denilen bir aralıktan geçirilen X ışınlarının doğrultuları daha kesin olarak belirlenir. Daha sonra saçak genişliği bilinen kristal yüzeyine gönderilir. Buradan yansıyan ışınların büyüklüğü bir ölçüm aletiyle tespit edilir. Hem kristal hem detektör döndürerek I şiddeti β açısının fonksiyonu olarak ölçülür. Bildiğimiz bragg yasası ile, I şiddetini bu sefer λ 'nın fonksiyonu olarak yani X ışını spektrumunu, belirleriz. Sabit bir açıdan yansıyan X ışınlarını alarak, diğer düzeneklerde kullanmak için, yine tek renkli bir X ışını sağlanabilir. Sonuç olarak dalga boyu bilinen X ışını sayesinde bragg yasasıyla kristaller incelenebilir. Denklemden Bragg yasası sayesinde öngörülen oldukça karışık kırınım saçaklarının yönelimlerinin ve buldukları düzlemlerin yol farkının fazla olması bu karışıklığın sebebidir. Belli bir çeşitteki düzlem kümesi için Bragg koşulu ve belirli maksimum doğrultuları öngörmektedir. Bragg yasasında karşılaştığımız ikinci bir engel ise tek kristal yapıdan ziyade bir çok mono kristal yapının mevcuttur. Bu şekilde çok yapıklı kristale X ışını gönderildiğinde sadece belli doğrultuda yapıcı ve verimli

girişimler oluşur. Bu doğrultuların geometrik yeri bir koni yüzeyi olup, ortaya çıkan kırınım dağılımı eş merkezli halkalar şeklinde olur [29].

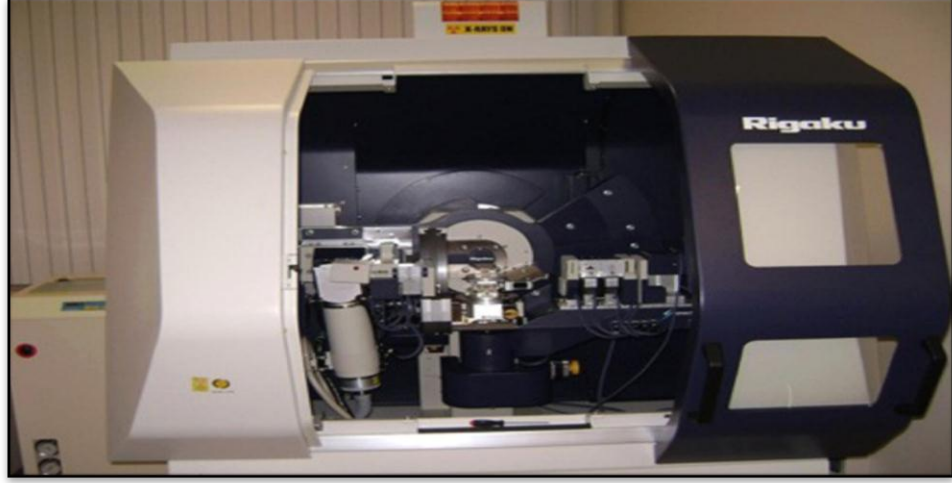


Şekil 3.8: Kristallerin X-Işını analizi.



Şekil 3.9: X ışını üreten sol üst başlık ile dedektör.

X-Işınları kristalin üzerine geldiğinde elektronlar tarafından soğurulur ve elektronlar salınım yapmaya başlar ve Salınan bu elektronlar bir x-ışını kaynağı gibi davranarak her yöne x-ışınları fotonları yayar. Kristalin farklı bölümlerinden saçılan bu fotonlar, toplanarak ölçülebilir bir x ışını şiddeti oluştururlar. Kristalde paralel düzlem takımları olduğunu varsayan Bragg koşulunun sağlandığı bu durumda, saçılan x-ışınları yapıcı girişim yaparak birbirlerini güçlendirmiş olacaktır.

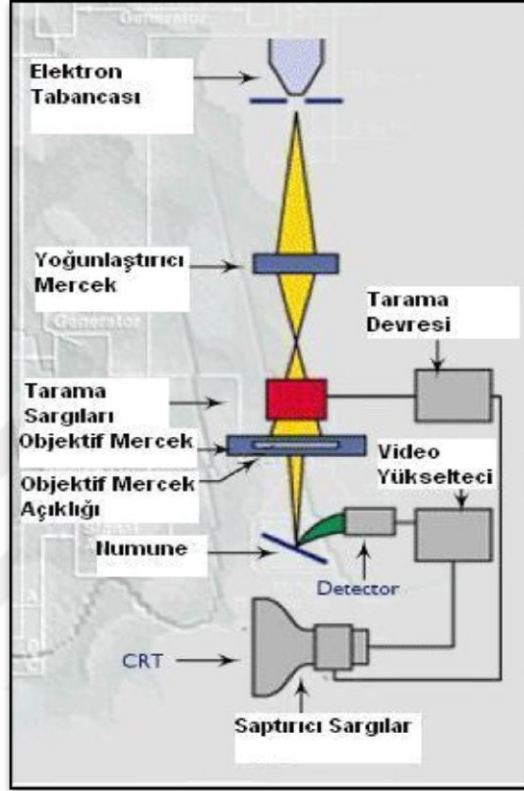


Şekil 3.10: XRD ölçüm cihazı.

3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu'nu oluşturan temel üç kısım Optik Kolon, Örnek yuvası ve Sonuç Ekranı 'dir. Optik kolon bölümünde; elektronların fırlatan tabanca, elektronları örneğe doğru fırlatmak için kullandığımız eksi yüklü bir levha, elektronların yoğunluğunu arttırmak için mercekle sistemleri, aynı şekilde elektronları odaklamak için mercekle, bu merceğe bağlı çeşitli ebatlarda yardımcı aletler ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Bahsettiğimiz mercekler hem elektromanyetik alanı hem elektron demetini yoğunlaştırmakta hemde örnek üzerine odaklanmaktadır. Bütün bu bahsettiğimiz düzenekler 10^{-4} Pa gibi bir basınç ortamında çalışmaktadır. Görüntü sisteminde, elektronları, ve bu elektronların girişimi sonucunda oluşan elektron ve bunun sonucundaki ışınları biriktiren dedektörler, sinyal güçlendiriciler, ve numune ve elektron demetini beraber tarayan manyetik düzenekler mevcuttur. Bahsettiğimiz elektron demeti ve numunenin etileşim sonuçları Şekil.3.3.1.'de şematik olarak gösterilmektedir. Dikkat edilirse bu girişim bulk olarak su damlası olarak tanımlanır. Yüksek enerjili demet elektronları numune atomlarının dış yörünge elektronları ile elastik olmayan girişimi sonucunda düşük enerjili Auger elektronları oluşur. Bu bahsettiğimiz elektronlar örnek yüzeyi hakkında bilgi taşırlar ve Auger Spektroskopisi bu şekilde çalışır. Yörüngede bulunan elektronlar ile yörüngeden atılanlar yoğunlaştırılmış bir şekilde enerjisi azalarak örnek yüzeyinde toplanırlar. Bu elektronlar ikincil elektron (seconder electrons) olarak tanımlanır. Bu elektronlarda

örnek düzleminin bulunduğu odada toplanarak bir başka bilgi kaynağı sinyalleri verir. İkincil elektronlar numune yüzeyinin 10 nm veya daha düşük derinlikten geldiği için numunenin yüksek çözünürlüğe sahip topografik görüntüsünün elde edilmesinde kullanılır.



Şekil 3.11: SEM ölçüm cihazı şeması.

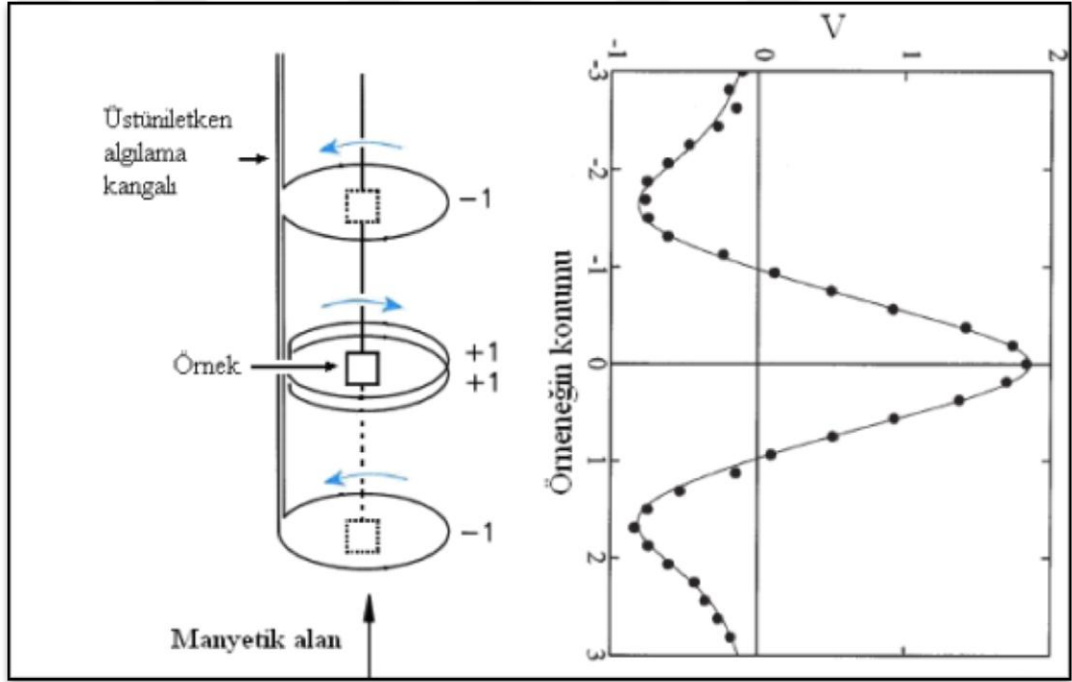
3.4. Mıknatıslanma Ölçüm Tekniği

Mıknatıslanma ölçümleri enstitümüzün bünyesinde bulunan PPMS (Physical Properties Measurement System) Cihazıyla yapılmıştır. Burada Bu cihaz bünyesinde bulunan VSM (Vibrating Sample Magnetometer) ayrı bir önem arz etmektedir

Bu sistem ile 2 K-1000 K sıcaklık aralığında ölçümler yapılabilmekte ve malzemelere 9 Tesla değerine kadar manyetik alan uygulanabilmektedir. Bu cihaz kullanılarak iki farklı opsiyon ile iki farklı türde ölçümler yapılabilmektedir. Bu opsiyonlardan birincisi ve bizi şu an için ilgilendiren VSM opsiyonu, diğeri ise manyetik alan altında direnç ölçümlerine olanak sağlayan manyeto-direnç

opsiyonudur. VSM ince film, bulk, toz ve sıvı örneklerin mıknatıslanma ölçümlerini yapabilmektedir.

PPMS bir dış manyetik alan uygulayabilen üstün-iletken manyete sahip ve ölçüm sıcaklık aralığı ise belirttiğimiz üzere 2K-1000K'dir. PPMS'de, sıvı helyum içine gömülmüş üstüniletken algılama kangalı içinde sabit hızla hareket eden örneğin konumuna göre indüklenen gerilim ölçülür. Konuma göre ölçülen gerilim değeri şekil 3.4.1'de görüldüğü gibidir. Herhangi bir manyetik alanda ve sıcaklıkta, mıknatıslanması iyi bilinen bir örnek ile bu işlem yapılarak, eğrinin tepe noktasındaki gerilim değeri bulunur. Diğer örnekler için elde edilen tepe noktasındaki gerilim değerleri de bu kalibrasyon değeri ile çarpılarak mıknatıslanma değeri emu cinsinden bulunmuş olur.



Şekil 3.12: PPMS'in ölçüm yönteminin şematik gösterimi.



Şekil 3.13: Mıknatıslanma ölçümlerinde kullanılan PPMS.

PPMS aslında basit Faraday yasasının uygulamasından başka bir şey değildir. Bildiğimiz gibi Faraday yasası değişen bir manyetik akının elektromotor kuvveti oluşturacağını söyler. A alanına sahip n sarımlı bir bobinin B manyetik akısındaki değişimin oluşturacağı elektromotorkuvvet aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\varepsilon = -nA \frac{dB}{dA} \quad (3.4)$$

Eğer H sabit manyetik alan içine numunemizi koyarsak yeni manyetik akımız

$$B = \mu_0 H \quad (3.5)$$

olur. μ_0 (Boşluğun manyetik geçirgenliği) eğer numunemiz bir M mıknatıslanmasına sahipse bu sefer manyetik akı değişimimiz,

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (3.6)$$

olur. Bahsettiğimiz iki denklem birleştirilirse,

$$Vdt = -nA\mu_0 M \quad (3.7)$$

elde edilir. Yani elektromotor kuvveti bobinin M mıknatıslanmasıyla orantılıdır.

3.5. Manyetik Rezonans Ölçüm Tekniği

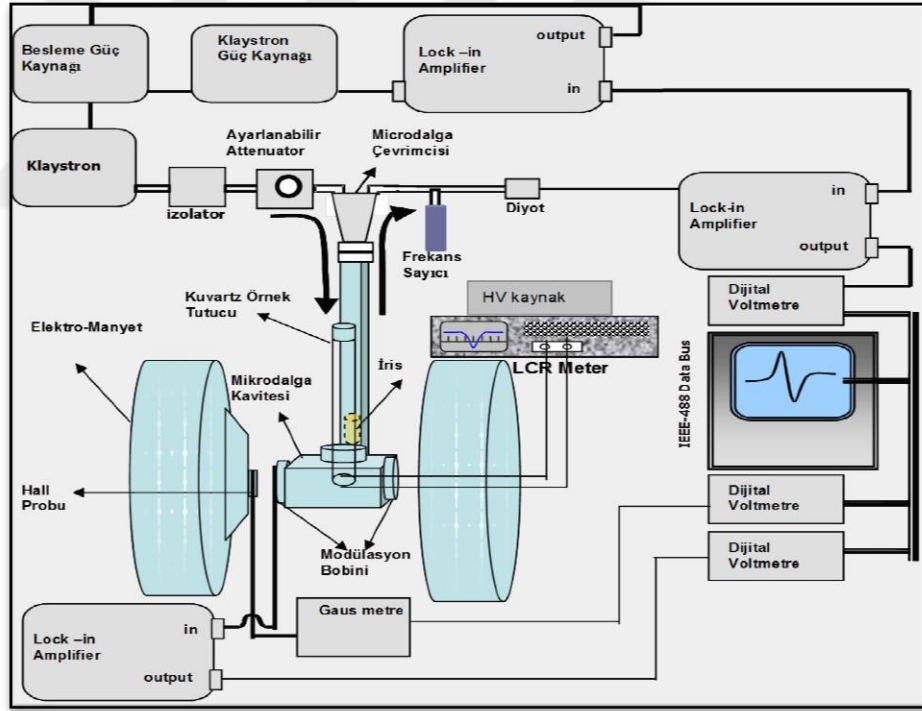
Magnetik Rezonans ölçümleri enstitümüzün bünyesinde bulunan Magnetik Rezonans deney seti sayesinde ölçülmüştür. Söz konusu düzenek geniş sıcaklık alanında ve aynı zamanda dış elektriksel alanın da etkisi altında ferromagnetik ve elektron paramagnetik rezonans ölçümleri de yapmağa imkan veriyor.

Elektron Paramanyetik Rezonans (EPR) spektrometrelerinde rezonans koşulunda da görüldüğü gibi elektromanyetik dalga frekansının değişken, manyetik alan şiddetinin sabit veya manyetik alan şiddetinin değişken, elektromanyetik dalga frekansının sabit tutulması şeklinde rezonansın gözlemlenmesi gerçekleştirilebilir. Elektromanyetik dalga frekansını değiştirebilecek cihazların maliyetinin yüksek oluşundan genellikle sabit frekanslı elektromanyetik dalga uygulanarak manyetik alan şiddetinin doğrusal bir şekilde değiştirilmesi ile rezonans gözlenmektedir. Epr spektrometrelerinde çoğunlukla 8-10 GHz (X-band) frekans aralığında elektromanyetik dalgalar kullanılmaktadır. Ayrıca bu frekans aralığından daha düşük ve yüksek frekansların kullanıldığı spektrometrelerde mevcuttur. Kullanılan diğer frekans aralıkları 1-2 GHz (L-band) ve 2-4 GHz (S-band), 35 GHz (Q-band) ve 95 GHz (W-band) şeklindedir.

Magnetik alanın nedeniyle ortaya çıkabilecek kutuplanma akımlarını ölçebilecek ve elimizde bulunan alınmış pikoampermetre de deney düzeneğimize katılmıştır. Buna ek olarak laboratuvarımızda daha önceden bulunan düşük ve yüksek sıcaklıklarda ve değişik elektrik alanlarda ölçüm yapabilen deneysel düzenek kurulmuştur. Aynı şekilde elimizde bulunan PPMS (Physical Properties Measurement System) kapsamında ki VSM (Vibrating Sample Magnetometer) eklenen tasarlanmış tutucu ve elektiriksel güç kaynağı gibi geliştirmelerdir. Bu düzeneğin resmi ve şeması da Şekil 3.5.1. ve Şekil 3.5.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14: Manyetik rezonans ölçüm düzeneğinin resmi.



Şekil 3.15: Manyetik rezonans ölçüm düzeneğinin şeması.

3.6. Dielektrik Sabiti Ölçümleri

Bu çalışmada kristallerin dielektrik özelliklerinin incelenmesi için dielektrik spektroskopi yöntemi öngörülmüştür. Bu ölçümleri yapmak için malzememize bir

elektromanyetik dalga uygulamış ve dalga sinyaline karşı aldığımız yanıt kapasitans köprüsü metodu ile ölçülerek elektriksel sığa ve elektriksel iletkenlik beraber ölçülmüştür.

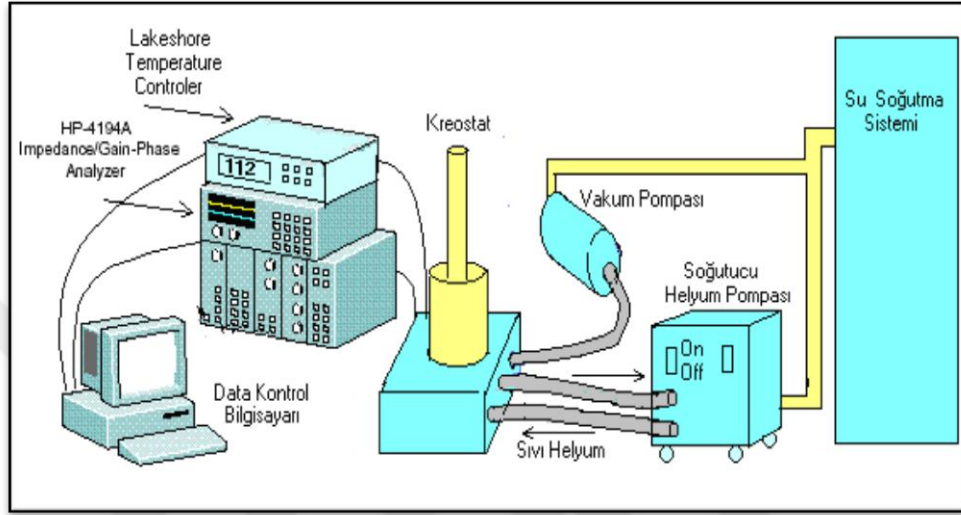
Örneğin kapasitans değeri oda sıcaklığında 5 kHz'de 10 pF mertebesindedir. Ölçülen parametrenin çok küçük olmasından dolayı kreostat sistemi dış etkenlerden korunmalıdır. Bunların en başında da kullanılan kablo sisteminin uygunluğu ve sistemin topraklanması gelmektedir. Bu sebeple kreostat ve Empedans analizörü arasındaki kablolama sisteminde kayıp faktörü düşük dış kalınlığı mümkün olabildiğince ince olan (2-3 mm) koaksiyel kablolar kullanılmıştır. Kreostat içindeki düşük sıcaklıkta deforme olmaması açısından bu kabloların teflon kaplı olanı tercih edilmiştir. Kablo ek yerlerinde sistemin frekans etkilerinden arınması açısından ekranlama işlemine önem verilmiştir. Ayrıca tüm sistem ayrı bir topraklama ünitesine bağlanmıştır. Deney sisteminde kullanılan tüm cihazlardan alınan toprak uçları tek bir noktada birleştirilip toprağa verilmiştir.

Terminal konfigürasyonu bu ölçümler için önemli bir faktördür. Eğer ölçülecek empedans çok küçük ise ($>1\Omega$) kablolar arası etkileşim hatalı sonuçlar verir. Bunun için bir otomatik balans köprüsü genel olarak empedans analizörünün ön panelindeki dört çıkış kullanılarak yapılır. Bu çıkışlar yüksek akım (H_c), yüksek potansiyel (H_p), düşük potansiyel (L_p) ve düşük akım (L_c) çıkışlarıdır. Bu etkileri elimine etmek için dört terminal konfigürasyonu kullanılır. Bu tekniğin aslı şudur. Terminallerden teflon kaplanmış koaksiyel kablolar ile alınan H_c ve H_p ekran çıkışları kendi arasında ve L_p ve L_c ekran çıkışları da kendi arasında örneğe yakın bir yerde birleştirilir ve daha sonra bunlar da kendi aralarında tekrar birleştirilir. Koaksiyel kabloların iç telleri ise aynı şekilde birleştirilmek suretiyle örneğin elektrotlarına bağlanır. Bu teknikte terminaller ile örnek arasında kullanılan toplam kablo uzunluğu 1m olmalıdır, böylece bu bağlantı şekli 100 Hz-15 MHz arasında ölçüm yapabilme imkanı sağlar.

Dielektrik spektroskopisinde düzlem kapasitör şeklinde örneğin elektrotlarının altın ile kaplanması gerek iletim gerekse paslanma ve diğer sebepler açısından en çok tercih edilen metal olup örnek üzerine alüminyum folyo ile yapılan bir maske sayesinde düzgün evaporasyon sağlanır. Ancak bu işlem yapılmadan önce örneğin yüzeyi iyice temizlenmeli ve evaporasyon yapıldıktan sonra örnek paralel plakalı kapasitör haline getirilmelidir.

Dielektrik sabiti ölçümlerinde C-D ölçüm sonuçlarını kullanarak dielektrik sabitini türettik. Öncelikle elektrotları test edilen malzemenin yüzeyine uygulanan

ince filme temas ettirdik. Bu sayede dielektrik katsayısını üretmek için sadece bir ölçüme ihtiyaç duyulur. İnce filmimize elektrotları ölçümden önce uyguladık ve bu ölçümde şuna dikkat ettik ki yüzeyler sıkıştırılabilir olmamalı ve düzgün olmalı. Yüzeyler ve elektrotlar arasındaki hava boşluğundan kaynaklanan hatalar en aza indirilebilir.



Şekil 3.16: Dielektrik ölçümü için kullanılan düzenek.

Aşağıda dielektrik sabitinin hesaplanması için kullanılan denklem verilmektedir,

$$\epsilon_{0r} = \frac{t_a \cdot C_p}{A \cdot \epsilon_0} \quad (3.8)$$

- $D_t = D$

- $C_p =$ Test numunesinin eşdeğer kapasitansı (F).

- $t_a =$ Test numunesinin ortalama kalınlığı (m).

- $A =$ Korumalı elektrodun alanı (m^2).

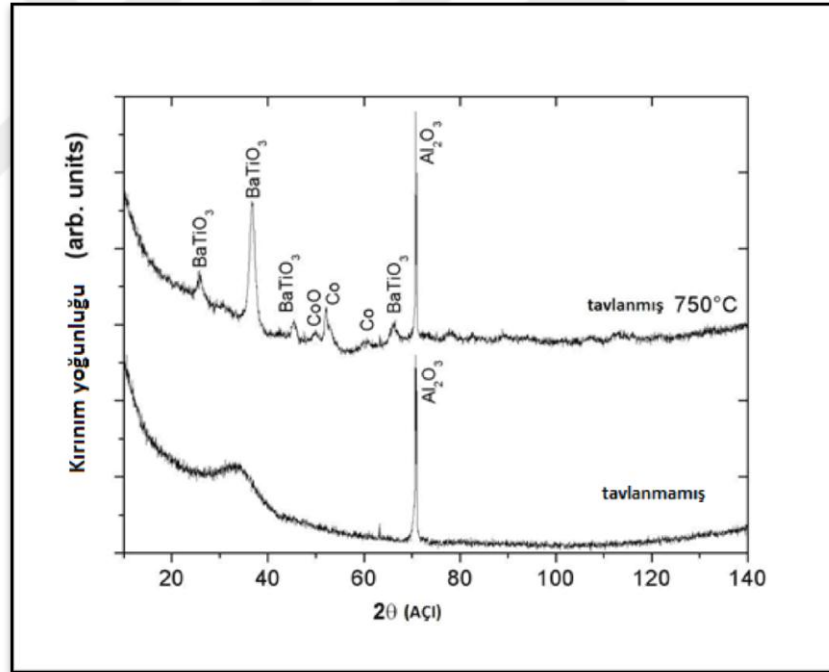
- $\epsilon_0 =$ Boşluğun dielektrik sabiti ($8.85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{M}$). $\epsilon_{0r} =$ Test numunesinin dielektrik sabiti

- $D_t =$ Test numunesinin dağılım faktörü.

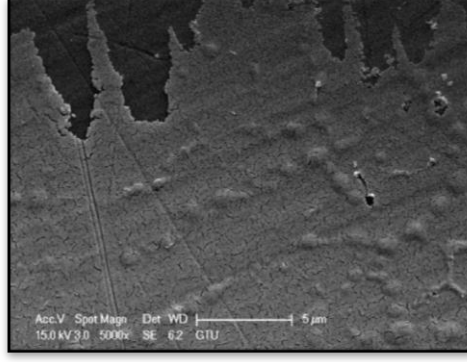
4. DENEYSEL BULGULAR

4.1. Yapısal İncelemeler

IBSD yöntemi ile sentezlenmiş $\text{BaTiO}_3:\text{Co}$ kompozit ince filmlerinin Co konsantrasyonunun % 9-10 civarında olduğunu tespit edilmiştir. Bu filmlerin XRD spektresi Şekil 4.1.1.'de gösterilmiştir. X-ışın kırınımı sonuçları, 750°C sıcaklığında vakumda tutulduktan sonra bu filmlerde tetragonal BaTiO_3 yapısı ile beraber heksagonal Co metal ve CoO oksit yapılarının bir arada bulunduğunu göstermiştir. Böylece, yapısal inceleme sonuçları, adı geçen filmlerde polikristal BaTiO_3 kristal matrisi içinde Co nanoparçacıklarının ve ayrıca oksijen fazlalığı sonucunda Co metallerinin oksitlenmiş şekilde bulunduğunu teyit etmiştir.



Şekil 4.1: IBSD yöntemi ile sentezlenmiş ve 750°C sıcaklığında vakum ortamında 30 dakika süresince tavlanmış $\text{BaTiO}_3:\text{Co}$ kompozit ince filmlerinin X-ışın kırınım spektrileri.



Şekil 4.2: BaTiO₃:Co kompozit ince filminin yüzey morfolojisi.

İBSD yöntemiyle manyetik nano parçacık püskürtülmüş olan numuneler üzerindeki yapısal çalışmalar, Philips XL30 SFEG Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yüzey görüntülerinin elde edilmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Co nanopartikülleri içeren BaTiO₃ kompozit malzemenin SEM tekniği ile elde edilen yapısal inceleme sonuçları Şekil 4.1.2.'de gösterilmektedir.

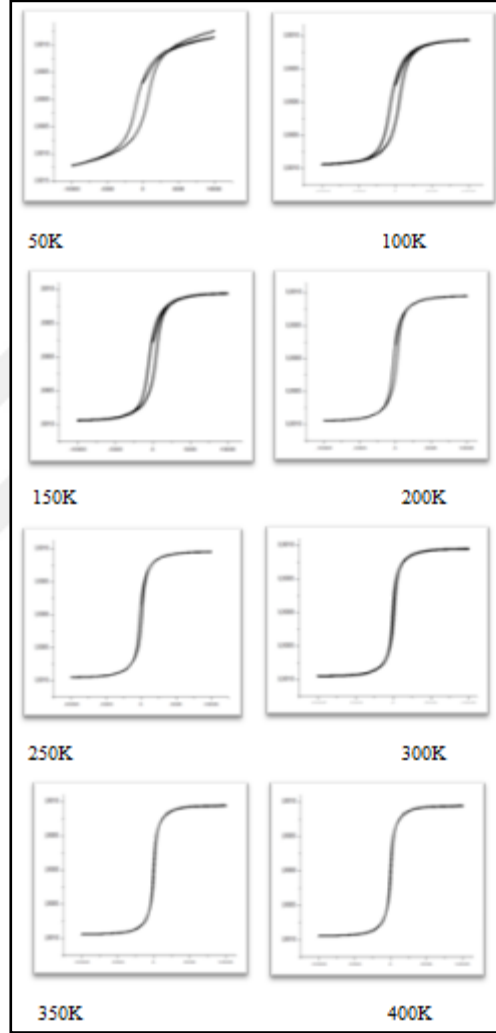
İBSD yöntemi ile sentezlenmiş BaTiO₃:Co kompozit ince filmlerinin. Böylece, yapısal inceleme sonuçları, adı geçen filmlerde polikristal BaTiO₃ kristal matrisi içinde Co nanoparçacıklarının ve ayrıca oksijen fazlalığı sonucunda Co metallerinin oksitlenmiş şekilde bulunduğunu teyit etmiştir. Önce homojen ve amorf yapıda olan ince filmimizin, tavlandıktan sonra kristal yapı içinde boyutları 5 ile 40 nm arasında değişen Co metal nanoparçacıkları içerdiği tespit etmiştir.

4.2. Manyetik Özellikler

Co eklenmiş baryum titanat molekülleri'nin manyetik özellikleri ve termomanyetik analizi incelendi. Ayrıca manyetik histerizis eğrileri örnek döndürücü VSM (Vibrating Sample Magnetometer) cihazı ile kaydedildi .Bu eğrileri 50 K ve 400 K arasında çeşitli sıcaklıklarda -1000 ve +1000 Oe aralığında manyetik alan uygulayarak elde ettik. Dikkat çekici bir unsurda şekildeki histerizis eğrileri ferromanyetik benzeri bir davranış sergilemektedir, bunun nedeni ise ferromanyetik nanoparçacıkların belli bir kalınlığa kadar oluşturduğu hetero-yapıdır.

Yukarıda bahsettiğimiz 10 K – 400 K sıcaklık aralığında mıknatıslanmanın $M(H)$ manyetik alan bağımlılıkları Şekil 4.2.1.'da gösterilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi, oda sıcaklığında elde edilmiş $M(H)$ eğrileri bariz bir superparamanyetik davranış sergilemektedir. Sıcaklık düşürüldüğünde 200 K'den

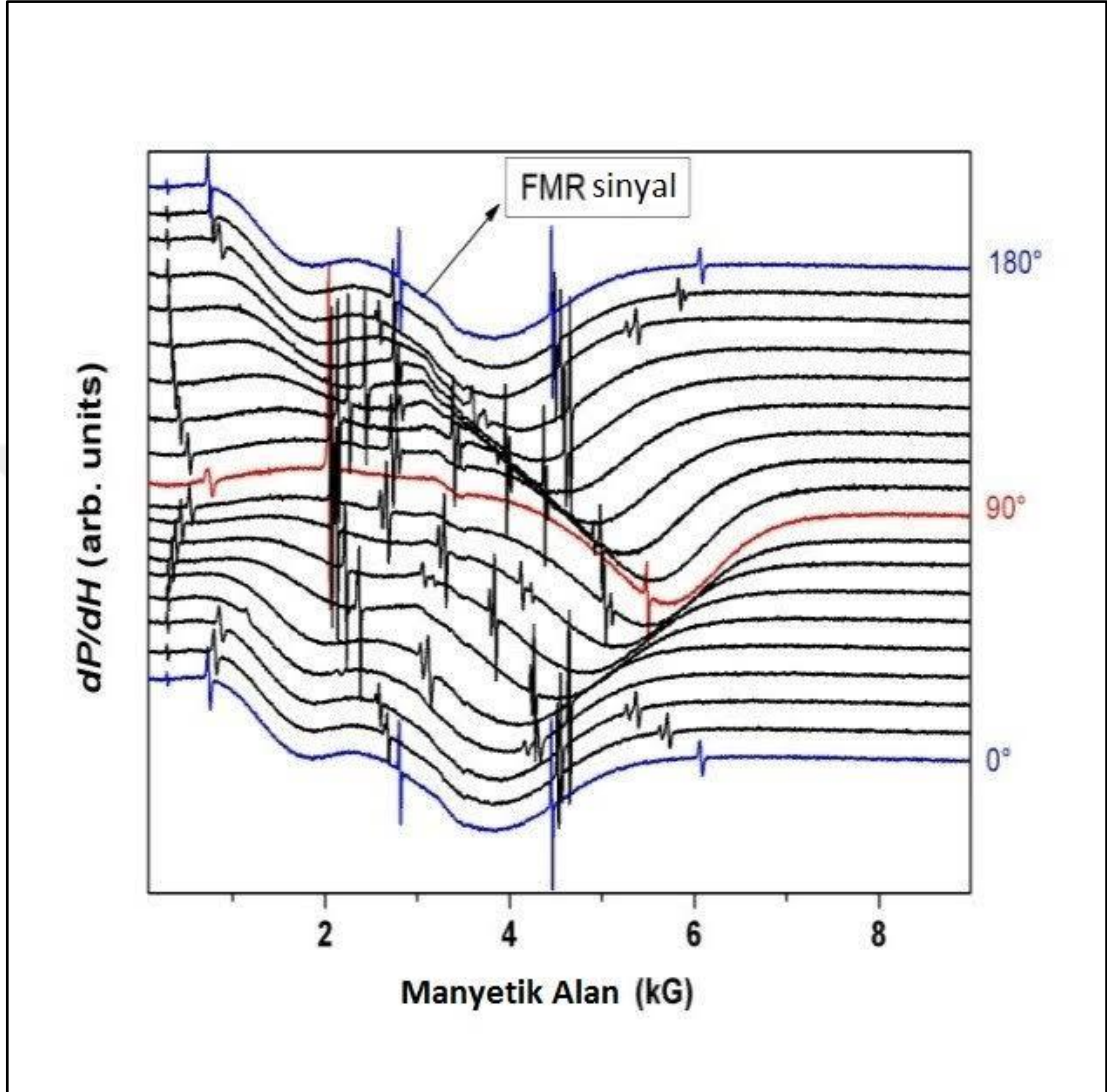
düşük sıcaklıklarda zayıf ferromanyetik düzen oluşumu gözlenmektedir. Nihayet, 50 K ila 100 K sıcaklığında net bir ferromanyetik düzenin ortaya çıkışı söz konusudur. Ferromanyetik mıknatıslanma daha önce bahsedilen örneklerde olduğu gibi net bir anizotropi sergilemektedir: 50 K sıcaklığında elde edilmiş ferromanyetik histeresis ilmiklerinden görülüyor ki, örneğin düzlem üzerindeki izotropik mıknatıslanması düşük alan büyüklüklerinde doyum değerine ulaşmaktadır.



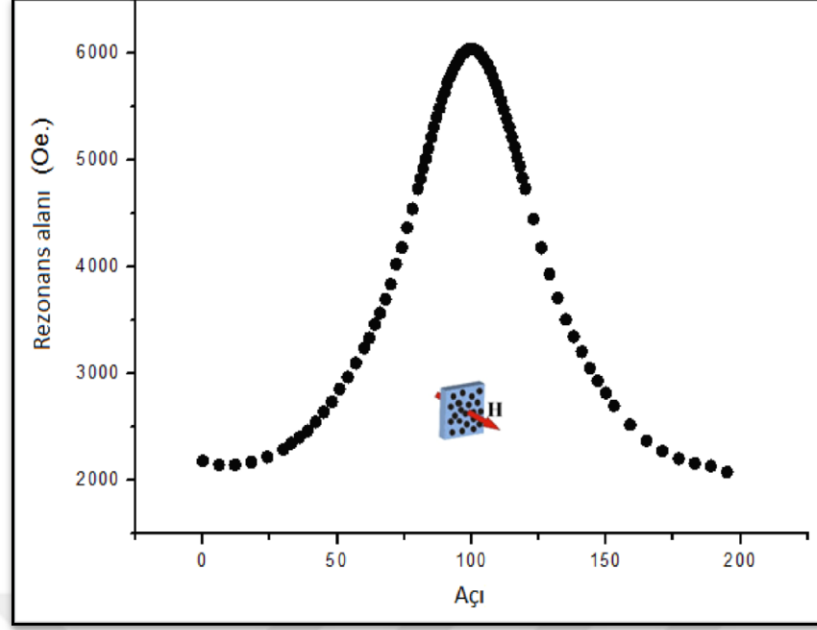
Şekil 4.3: Farklı sıcaklıklarda ölçülmüş BaTiO₃:Co kompozit ince filminin ferromanyetik histeresis eğrileri (yatay eksen manyetik alan, düşey eksen manyetik momenti temsil etmektedir)

Düzlem dışı anizotropinin örneklerdeki etkisini incelemek adına sabit manyetik alanda farklı manyetik rezonans spektrileri örnek düzlemine göre kaydedilmiştir. Şekil 4.2.2.'den de anlaşılacağı üzere manyetik rezonans spektrileri

ve elektron paramanyetik rezonans ve ferromanyetik rezonans sinyallerini beraber içeriyor.



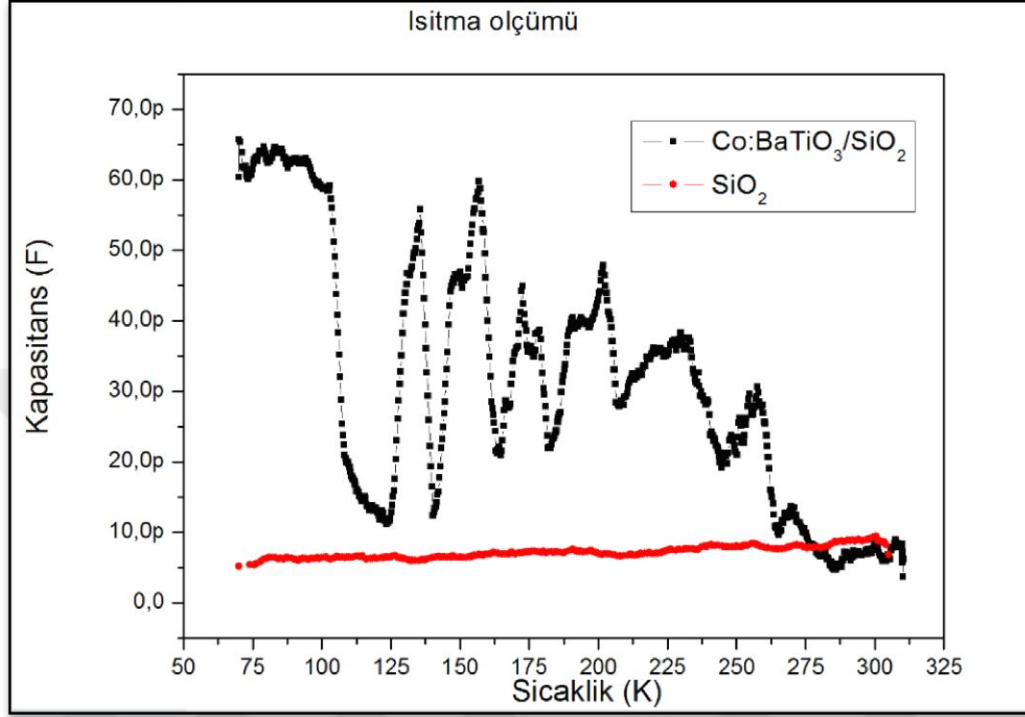
Şekil 4.4: Düzlem dışı ölçüm geometrisinde manyetik alanın farklı yönelimlerinde BaTiO₃:Co kompozit ince filminin manyetik rezonans spektrileri.



Şekil 4.5: BaTiO₃:Co kompozit ince filminde ferromanyetik rezonans alanının açısall bağımlılıkları.

Manyetik rezonans spektresinde FMR piklerinin varlığı ferromanyetik bir yapıya işaret etmektedir. Buda Co nanoyapıların varlığına işaret etmektedir. Belli bir manyetik alanın düzleme paralel olduğu durumlarda yani 0-180 derece açılarda FMR sinyalleri düşük alan bölgelerinde vardır. Manyetik alanın dik olduğu durumlarda ise FMR sinyalleri yüksek spektreli alan bölgelerinde gözlenmektedir. Şekil 4.2.3'de örneklerin açısall bağıntıları rezonans alana bağılı olarak gözlenmektedir. Burada Co katkılanmış nanoparçacıklar arasında güçlü manyetik dipol etkileşimin varlığı kanıtlamaktadır.

4.3. Dielektrik Özellikler



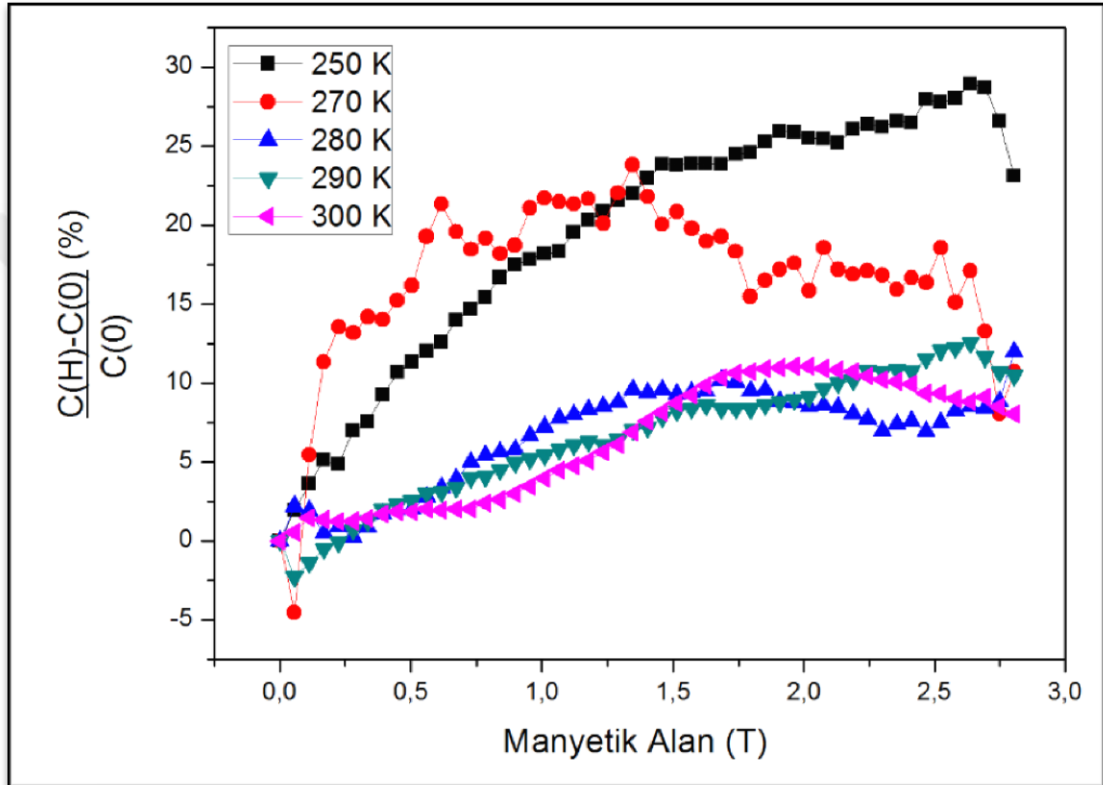
Şekil 4.6: BaTiO₃:Co kompozit ince filminin kapasitansının sıcaklığa bağlı değişimi.

BaTiO₃'daki ferroelektrik (yapısal) faz geçişi katıhal fiziğinin çok ilginç konularından birisi olmuştur. BaTiO₃'da 120 °C yakınında faz geçişinin sebebi, keşfinden beri son 50 yıldır tartışılmıştır. Bu faz geçişinin sebebini açıklamak için iki bağımsız teori öne sürülmüştür. Birincisi, faz geçişinin Ti⁺⁴ ve O⁻² arasındaki elektrostatik çekici kuvvetten dolayı olduğu ikincisi, temel ve uyarılan durumlar arasındaki band aralığı boyunca elektron-fonon etkileşmesi varsayımına dayanmaktadır. Bu iki teorinin doğru olduğunu belirlemek için hiçbir açık deneysel veri olmamaktadır.

4.4. Manyetoelektrik Etkiler

İncelenen malzemelerde manyetoelektrik etkinin incelenmesi için magnetokapasitans (veya magnetodielektrik), etkilerinin incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

BaTiO₃:Co kompozit ince filminin dielektrik özellikleri de araştırıldı. Şekil 4.3.2.'den görüldüğü gibi manyetokapasitans etkisi Co katkılı BaTiO₃ kompozit sistemde, manyetoelektrik etkileşmelerin varlığını kanıtlamıştır. Burada Şekil 4.3.2.'den anlaşıldığı gibi lineer olmayan bir davranış söz konusudur, bu Co:BaTiO₃ kompozit yapımızda dielektrik kutuplanmayla mıknatıslanma arasındaki etkileşim sonucudur.



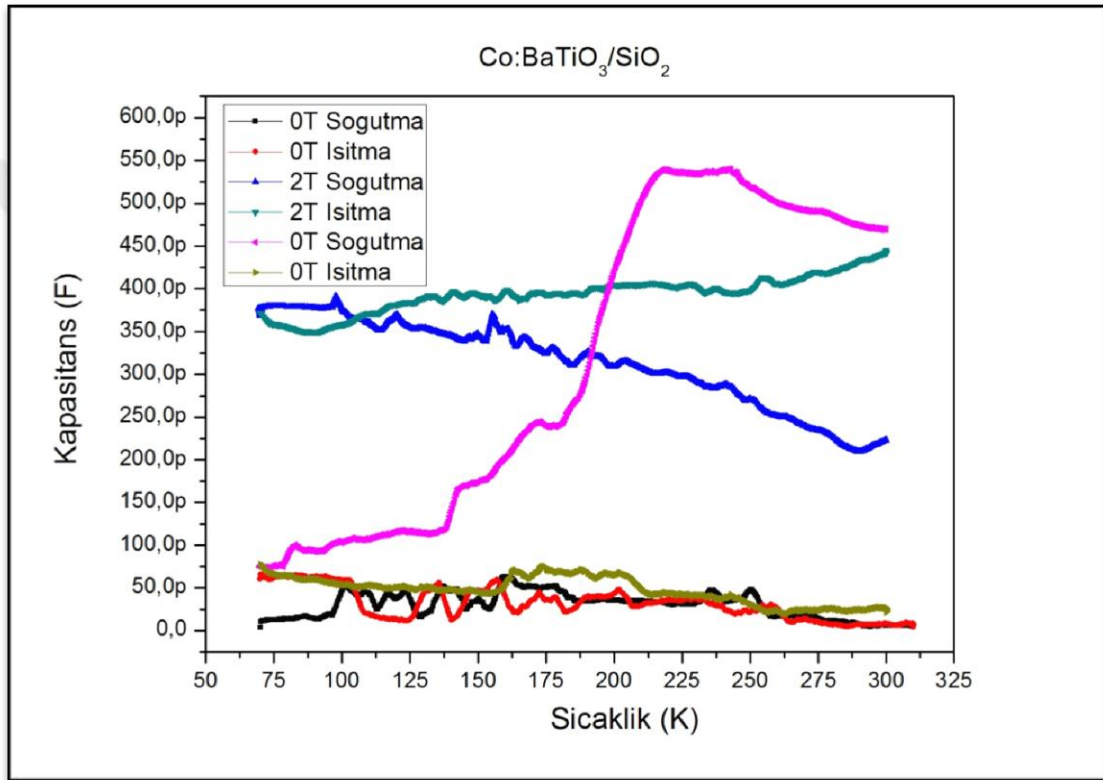
Şekil 4.7: BaTiO₃:Co kompozit ince filminin manyetik alanın fonksiyonu olarak kapasitansındaki değişim oranı.

Örneklerin farklı manyetik alanların etkisi altında ölçülmüş dielektrik sabitinin bağıntılarından görüldüğü gibi, manyetik alanın etkisi altında dielektrik sabitinin yükselişi söz konusudur. Bu, kristal matris içinde nanoparçacık yerleşiminden ileri gelen deformasyon sonucu tetiklenen polarizasyon artışına bağlandı. Manyetik alan etkisi altında ise nanoparçacıklarda ortaya çıkan magneto-striksiyon etkileri bu deformasyon oranında yükselmelere ve bunun sonucunda da belirgin polarizasyon artışlarına neden oluyor.

Her şeyden önce onu söylemek gerekiyor ki, partiküller kompozitlerdeki magnetodielektrik etkilerin büyüklüğü, bu etkinin deformasyon aracılığı ile

gerçekleşmesinin reel kanıtıdır. Kristal matris içindeki manyetik partiküllerin manyetik alanın etkisi ile deformasyonu kristalin hacmi içinde gerçekleşmekle farklı bölgelerde farklı yönde deformasyonlar oluşturuyor ve hacim boyunca toplam efektif pizeoelektrik etkinin zayıf olmasına neden oluyor.

Burada yüksek sıcaklıklarda ferromanyetik etkinin yok olduğunu görüyoruz. Bunun sebebi Co nano parçacıklarının bu sıcaklık civarında oksitlenmesi ve BaTiO₃:Co kompozit ince filminin içine nüfus etmesi olabilir.



Şekil 4.8: BaTiO₃:Co kompozit ince filminin, farklı manyetik alan değerlerinde ısıtma ve soğutma rejimlerinde ölçülmüş kapasitansının sıcaklığa bağlı değişimi.

Şekil 4.4.1.'de görüldüğü gibi, eğriler yüksek sıcaklıklarda birbirlerinden ayrılıyorlar. Grafiklerdeki bu ayrılmanın, engelleme sıcaklığında süperparamanyetik davranışın bir göstergesi olduğu anlaşılmaktadır. Bu arada grafik eğrileri yüksek sıcaklıklara kadar karakteristik ferromanyetik özellikler göstermektedir. Bu olay parçacıklı yapılar için tipik bir davranıştır. Son olarak, mıknatıslanmanın sıcaklık bağımlı ölçümlerinde elde ettiğimiz çok daha önemli bir buluşu kaydedelim. Yüksek sıcaklıklarda 3 adet anomali görülmektedir. Bu anomaliler çekim noktaları (inflection points) şeklindedir. Anomalilerin bulunduğu sıcaklıkların ($T_{c1} \sim 180$ K,

$T_{c2} \sim 280\text{K}$, $T_{c3} \sim 390\text{K}$) BaTiO₃ ferroelektrik kristalinde sırasıyla “rombohedral-ortorombik”, “ortorombik-tetragonal” ve “tetragonal-kübik” faz geçişlerinin sıcaklıkları olduğu iyi bilinmektedir. Böylece, ferroelektrik bölgede gerçekleşen faz değişimlerinin, manyetik özellikleri önemli boyutta etkilemekte olduğunu görüyoruz. Bu etkileşimin magnetoelastik ve magnetoelektrik niteliklerde olabileceği anlaşılmıştır.



5. SONUÇLAR

Magnetokapasitans (magnetodielektrik) etkileri son yıllarda magnetoelektrik malzemelerde çok yaygın şekilde araştırılmaktadır. Bizim çalışmamızda en baştan belirlediğimiz önemli amaçlardan birisi incelediğimiz magnetoelektrik malzemelerin dielektrik özelliklerine manyetik alanın etkisinin öğrenilmesi olmuştur.

İncelememiz neticesinde İBSD işlemi sonucunda oluşan Co nanoparçacıklardan dolayı kristalimizde ferromanyetik özellik gözlenmiştir.

Dielektrik sabitinin manyetik alan bağıntıları incelenmiştir. BaTiO₃:Co'nun hem dielektrik sabitinin, hem de magnetokapasitans etkinin büyümesi açıkça görülüyor. Böylece, magnetoelektrik kompozitlerdeki magnetokapasitans etkilerin stres-deformasyon nitelikli olduğu sonucuna varmamızda esas neden, yeteri kadar düşük manyetik alanın etkisi altında dielektrik sabitinde gözlemlediğimiz kayda değer değişimin söz konusu olmasıdır ki, mikroskopik orijinli multiferroik özellikler sergileyen tek kristallerde bunun gözlenmesi imkansızdır. Gözlenen bu etkilerin hem teorik yorumu, hem de adı geçen örneklerin daha ileriki deneysel incelenmeleri için elverişli imkanlardan bahsedebiliriz.

Son olarak, mıknatıslanmanın sıcaklık bağıntı ölçümlerinde elde ettiğimiz çok daha önemli bir buluşu kaydedelim. T_B sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda 3 adet anomali görülmektedir. Bu anomaliler çekim noktaları (inflection points) şeklindedir. Anomalilerin bulunduğu sıcaklıkların ($T_{c1} \sim 180$ K, $T_{c2} \sim 280$ K, $T_{c3} \sim 390$ K) BaTiO₃ ferroelektrik kristalinde sırasıyla “rombohedral-ortorombik”, “ortorombik-tetragonal” ve “tetragonal-kübik” faz geçişlerinin sıcaklıkları olduğu iyi bilinmektedir. Böylece, ferroelektrik bölgede gerçekleşen faz değişimlerinin, manyetik özellikleri önemli boyutta etkilemekte olduğunu görüyoruz. Bu etkileşimin magnetoelastik ve magnetoelektrik niteliklerde olabileceği anlaşılmıştır. Bu yüzden, BaTiO₃:Co kristallerinde ve bu malzemelere dayalı multiferroik kompozit ince filmlerde magnetoelektrik özelliklerin incelenmesi büyük önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Nan W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G., (2008), "Multiferroic magnetoelectric composites: historical perspective, status, and future directions ", *Application Physics*, 103 (3), 031101.
- [2] Eerenstein W., Mathur N. D., J. Scott F., (2006), "Multiferroic and magnetoelectric materials", *Nature*, 442(7104), 759-765.
- [3] Landau L. D., Lifshitz E. M., (1984), "Electrodynamics of Continuous Media, 2nd Edition", Butterworth-Heinmann, 460
- [4] Hill N. A., (2000), "Journal of Physics Chemistry", *Naturwissenschaften*, 6694.
- [5] Fiebing M., (2005), "Revival of the magnetoelectric effect", *Journal of Physics: Application Physics.*, *Materials Research Bulletin* , 38, R123, R152.
- [6] Odell T.H., (1963), "The field invariants in a magneto-electric medium", *Philosophical Magazine*, 8, 411-418, T647.
- [7] Wang J J., Neaton.B., Zheng H., Nagarajan V., Ogale S.B., Liu B., Viehland D., Vaithyanathan V., Schlom D.G., Waghmare U.V., Spaldin N.A., Rade K.M., Wuttig M., Ramesh R., (2003), "Epitaxial BiFeO₃ Multiferroic Thin Film Heterostructures", *Science*, 299, 1719-22.
- [8] Hill N.A., (2000), "Why Are There so Few Magnetic Ferroelectrics? ", *Journal of Physics.*, B 104, 6694-6709.
- [9] Ueda K., Tabata H., Kawai T., (1999), "Coexistence of ferroelectricity and ferromagnetism in BiFeO₃-BaTiO₃ thin films at room temperature", *Application Physics. Letter.* 75, 555-557.
- [10] Van Suchtelen, J. (1972). "Product properties: a new application of composite materials", *Philips Research Report* , 27 (1), 28-37.
- [11] Van Den Boomgaard., Terrell D.R., and Born R.A. J., (1975), "An in situ grown eutectic magnetoelectric composite material", *J. Mater. Sci.*, 9, 1705-1709.
- [12] Van Den boomgaard., van Run A.M.J.G., van Suchtelen J., (1976) "Piezoelectric-piezomagnetic composites with magnetoelectric effect, *Ferroelectrics*", 14, 727-28.
- [13] Van Den boomgaard J., Van Run A.M.J.G., Van Suchtelen J., (1976), "Magnetoelectricity in piezoelectric-magnetostrictive composites, *Ferroelectrics*", 10, 295-298.

- [14] Van Den boomgaard J., Born R.A.J., (1978), "Sintered magnetoelectric composite material BaTiO₃-Ni(Co, Mn) Fe₂O₄", Journal of material science., 13, 1538-48.
- [15] Harshe G., Dougherty J.P., Newnham R.E., (1993), "Theoretical modelling of 3-0/0-3 magnetoelectric composites," Introduction Application Electro-magnetic Mater. 4, 161-171, .
- [16] Srinivasan G., Rasmussen E. T., Levin B. J., and R. Hayer, (2002), "Magnetoelectric effects in bilayers and multilayers of magnetostrictive and piezoelectric perovskite oxides," Physics Review B 65, 134402.
- [17] Carazo R.J., A.V., Uchino K., Kim H.-E., (2001), "Magnetoelectric Properties in Piezoelectric and Magnetostrictive Laminate Composites," Japen Application Physics., 40, 4948-51.
- [18] Blichurin M., Petrov V.M., Srinivasan G., (2002), "Theory of low-frequency magnetoelectric effects in ferromagnetic-ferroelectric layered composites," Journal of Applied Physics 92, 7681-83.
- [19] Dong S., Li J.-F., Viehland D., (2003), "Ultrahigh magnetic field sensitivity in laminates of Terfenol-d., Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃ crystals," Application Physics Letter., 83, 2265-67.
- [20] Mori K., Wuttig M., (2002), "Magnetoelectric coupling in Terfenol-D polyvinylidenedifluoride composites," Application Physics Letter., 81, 100-101.
- [21] Ryu J., Priya S., Carazo A.V., Uchino K., (2001), "Effect of the Magnetostrictive Layer on Magnetoelectric Properties in Lead Zirconate Titanate/Terfenol-D Laminate Composites," Journal of American Ceramic Society, 84, 2905-08.
- [22] Chang K.-S. (2004), "Et al., exploration of artificial multiferroic thin-film heterostructures using composition spreads," Application Physics Letter., 84, 3091-93.
- [23] Liu G., Nan C-W., Cai N., Lin Y., (2004), "Dependence of giant magnetoelectric effect on interfacial bonding for multiferroic laminated composites of rare-earth-iron alloys and lead-zirconate-titanate," Journal of Application Physics, 95, 2660-64.
- [24] Murugavel P., Saurel D., Prellier W., Simon Ch., Raveau B., (2004), "Tailoring of ferromagnetic Pr_{0.85}Ca_{0.15}MnO₃ /ferroelectric Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO₃ superlattices for multiferroic properties," Application Physics Letter 85, 4424-26.
- [25] Nan C.-W., Cai N., Liu L., Zhai J., Ye Y., Lin Y., (2003), "Coupled magnetic-electric properties and critical behavior in multiferroic particulate composites," Journal of Application Physics 94, 5930-36.

- [26] Zheng H., Wang J., Lofland S.E., Ma Z., M L.. Ardabili, Zhao T., Riba L.S., Shinde S.R., Ogale S.B., Bai F., Viehland D., Jia Y., Schlom D.G., Wutting M., Roytburd A., Ramesh R., (2004), "Multiferroic BaTiO₃-CoFe₂O₄ nanostructures", Science, 303, 661-663.
- [27] Hou D., Z. Zhou, X. Ye, Q. Zhang, L. Ma, C. Zhen, (2012), "Physics Procedia," 32-498.
- [28] Ye X.J., Z.Z. Zhou, Zhong W., D.L. Hou, H.T. Cao, C.T. Au, Y.W. Du, (2012), "Thin Solid Films," 519-2163.
- [29] Serway R.A., Beichner R.J., (2002), "Fen ve Mühendislik için Fizik II 5. Baskıdan çeviri," Palme Yayıncılık.
- [30] Mikailzade F , Aktaş B, Özdemir M.,(2014), "İnce film ve katmanlı yapıları yeni magnetoelektrik nano- malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesi," Proje No: 106M540.

ÖZGEÇMİŞ

Umut ACAR 1980 yılında Antalya’da doğdu. 2000 yılında başladığı Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü’nü 2010 yılında başarıyla tamamlayarak, 2010 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda yüksek lisans programına başladı. 2010 yılından beri Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı’nda eğitimine devam etmektedir.

