



T.C.

KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİZMUT TABAKA YAPILI FERROELEKTRİK İNCE
FİLMLERDE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERE
MİKROYAPININ TESİRİ**

NURVET KIRKGEÇİT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANA BİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2014

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİZMUT TABAKA YAPILI FERROELEKTRİK İNCE
FİLMERDE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERE
MİKROYAPININ TESİRİ

NURVET KIRKGEÇİT

Bu tez,
Fizik Ana Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS
dergesi için hazırlanmıştır.

KAHRAMANMARAŞ 2014

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi NURVET KIRKGEÇİT tarafından hazırlanan “Bizmut Tabaka Yapılı Ferroelektrik İnce Filmlerde Elektriksel Özelliklere Mikroyapının Tesiri” adlı bu tez, jürimiz tarafından 30 /5 /2014 tarihinde oy birliği / oy çokluğu ile Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Osman ÖZSOY (BAŞKAN)
Elektronik ve Otomasyon Anabilim Dalı, Erciyes Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Sait BOZGEYİK (DANIŞMAN)
Katıhal Fiziği Anabilim Dalı
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet ASLANTAŞ (ÜYE)
Katıhal Fiziği Anabilim Dalı
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. M. Hakkı ALMA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

NURVET KIRKGEÇİT

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı tarafından desteklenmiştir.

Proje No:2013/4-25 M

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

BİZMUT TABAKA YAPILI FERROELEKTRİK İNCE FİLMLERDE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERE MİKROYAPININ TESİRİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında bizmut tabaka yapılı bir ferroelektrik olan SBT ince filmlerin mikroyapı (zerrelerin boyutu, şekli, morfolojisi, boyut dağılımları, sınırları, yüzey morfolojileri, gözenek yoğunluğu, film/elektrot arayüzeyleri gibi), farklı ikincil fazların oluşumu, kristal yapı ve kristal kalitesi gibi özelliklerin akım-gerilim (I-V), kapasitans-gerilim (C-V), kutuplanma-gerilim (P-V) gibi elektriksel özelliklere olan etkisi araştırılmıştır. SBT ferroelektrik ince filmlere ait olan Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) mikroyapı görüntülerinden ve kristal yapı XRD verileri elektriksel özellikler P-V, C-V ve I-V verileriyle anlaşılmasına çalışılmıştır. Kısaca filmlerin mikroyapısı anlaşılabilir elektriksel mekanizmalar ve özellikler yorumlanması verilerle beraber anlaşmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ferroelektrik İnce Film, Elektronik Malzeme, SBT, Sol-jel, Elektriksel Özellikler, Mikroyapı

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı, Mayıs, 2014

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Sait BOZGEYİK

Sayfa sayısı: 70

INFLUENCE OF MICROSTRUCTURE ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF BISMUTH LAYARED STRUCTURED FERROELECTRIC THIN FILMS

SUMMARY

In this thesis, it was investigated the influence of microstructure properties (like grain size, grain shape, grain morphology, size distributions, grain boundaries, porosity density, etc.), film electrode interfaces, formations of secondary phases, and structure and quality of crystal of SBT thin film, which is a bismuth layered structure type ferroelectric, on the electrical properties such as current-voltage (I-V), capacitance-voltage (C-V) and polarization-voltage (P-V). Atomic Force Microscopy (AFM) microstructure picture and X-ray diffraction (XRD) data of SBT thin films were studied to understand the electrical properties by means of P-V, C-V, and I-V data. Briefly, by studing the microstructure of the film, insights into the interpretation of the electrical mechanisms and properties were understood together with data.

Key words: Ferroelectric Thin Film, Electronic Material, SBT, Sol-gel, Electrical Properties, Microstructure

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Institute for Graduate Studies in Science and Technology
Department of Physics, May, 2014

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Sait BOZGEYIK

Page number: 70

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım sırasında her türlü olanağı sağlayarak, bilgi ve önerileriyle çalıőmalarıma yön veren ve yol gösteren değerli hocam ve tez danıőmanım sayın Doç. Dr. Mehmet Sait BOZGEYİK' e teőekkürlerimi sunarım.

Çalıőmalarım boyunca fikir ve görüşlerinden her zaman faydalandığım değerli hocam sayın Doç. Dr. Mehmet ASLANTAŞ' a teşekkür ederim.

Tez yazım aőamasında yardımlarını eksik etmeyen arkadaşım Bilge ÇAYLIOĞLU' na ve tüm çalışma arkadaşlarıma katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Eğitimim boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

NURVET KIRKGEÇİT

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET.....	i
SUMMARY	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. MATERYAL	
3. 1. Ferroelektriklik.....	11
3. 2. Ferroelektrik Domain ve Domain Anahtarlanması	18
3. 3. Ferroelektrik Malzemeler ve Cihazlar.....	23
3. 3. 1. Bizmut tabaka yapılı ferroelektrikler	28
3. 4. Ferroelektrik İnce Film Üretim Teknikleri.....	31
3. 4. 1. Sol-jel yöntemi	33
4. METOD	
4. 1. Ferroelektrik İnce Filmlerde Mikroyapı ve Analiz Yöntemleri	35
4. 2. Ferroelektrik İnce Filmlerde Elektriksel Karakterizasyon Yöntem ve Teknikleri.....	39
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	45
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
E	: Elektriksel alan şiddeti
P	: Elektriksel kutuplanma vektörü
p	: Elektrik dipol momenti
P_r	: Kalıcı kutuplanma
P_s	: Kendiliğinden kutuplanma
P_s	: Doyum polarizasyonu
E_c	: Zorlayıcı elektriksel alan
C	: Curie sabiti
T	: Sıcaklık
T_c	: Curie sıcaklığı
T₀	: Faz geçiş sıcaklığı
q	: Elektrik yükü
ε_r	: Dielektrik sabiti
ε₀	: Boşluğun elektriksel geçirgenliği
ΔQ	: Tek bir plakada depolanan yük
ΔV	: İki potansiyel arasındaki fark
A	: Plaka alanı
d	: Dielektrik malzemenin kalınlığı

Kısaltmalar	Açıklama
MEMs	: Mikro-Elektro mekaniksel sistemler
SBT	: Stronsiyum bizmut tantalat
PZT	:Kurşun zirkonyum titanat
RAM	: Rastgele erişim belleği
NVFeRAMs	: Uçucu olmayan ferroelektrik rastgele erişim bellekleri
DRAM	: Dinamik rastgele erişim belleği
MFM	: Metal-ferroelektrik-metal
MFS	: Metal-ferroelektrik-yarıiletken
MFIS	: Metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken
FET	: Alan etkili transistör
PLD	: Atmalı lazer depolama
PVD	: Fiziksel buhar depolama metodu
CVD	: Kimyasal buhar depolama metodu
CSD	:Kimyasal çözelti depolama metodu
MOCVD	: Metal-organik kimyasal buhar depolama metodu
XRD	: X ışınımı kırınımı
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SE	: Schottky emisyonu
PFE	: Poole-Frenkel emisyonu
FNT	: Fowler-Nordheim tünellemesi

SCLC : Uzay yükü sınırlı akımlar

AC :Alternatif gerilim

DC :Doğru gerilim

I-V : Akım-gerilim

C-V : Kapasitans-gerilim

P-V : Kutuplanma-gerilim

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.1. Ferroelektrik, piezoelektrik, pyroelektrik malzemelerin sistematik gösterimi....	2
Şekil 3. 1. 1. ABO_3 perovskit yapının (a) paraelektrik ve (b) ferroelektrik fazı.....	12
Şekil 3. 1. 2. $BaTiO_3$ ' in kristalografik dönüşümleri.....	13
Şekil 3. 1. 3. II. tür faz geçişlerinde kutuplanmanın sıcaklıkla değişimi.....	16
Şekil 3. 1. 4. I. tür faz geçişlerinde kutuplanmanın sıcaklıkla değişimi.....	17
Şekil 3. 2. 1. Bir ferroelektrik kristaldeki (a) 180° ve (b) 90° li domainlerin gösterimi.....	18
Şekil 3. 2. 2. Bir dış elektriksel alanın uygulanmasıyla domain anahtarlanma mekanizmasının evreleri.....	19
Şekil 3. 2. 3. Ferroelektrik kristalde kutuplanma-elektriksel alan değişim grafiği.....	21
Şekil 3. 3. 1. Kübik ABO_3 perovskit tipli birim hücre.....	24
Şekil 3. 3. 2. Metal-ferroelektrik ince film-metal (MFM) yapı	26
Şekil 3. 1. 1. 1. Bizmut tabaka yapılı SBT.....	29
Şekil 3. 4. 1. 1. Sol-jel yöntemiyle ince film üretim aşamaları.....	33
Şekil 4. 1. 1. Ufak zerrelili polikristal filmin mikroyapı gösterimi.....	35
Şekil 4. 1. 2. Atomik kuvvet mikroskobu çalışma prensibi.....	38
Şekil 4. 2. 1. Metal-ferroelektrik-metal yapı ve ölçümü.....	40
Şekil 4. 2. 2. Kapasitans-gerilim (C-V) eğrisi	42
Şekil 5. 1. Pt/ TiO_2 / SiO_2 /Si yüzeyler üzerinde $750^\circ C$ ' de tavlanan SBT ince filmin AFM görüntüsü.....	45
Şekil 5. 2. Pt/ TiO_2 / SiO_2 /Si yüzeyler üzerinde $750^\circ C$ ' de tavlanan SBT ince filmin XRD kristal kırınım deseni.....	46

Şekil 5. 3. Pt/TiO ₂ /SiO ₂ /Si yüzeyler üzerinde 750 °C’ de tavlanan SBT ince filmin histerise eğrisi.....	47
Şekil 5. 4. Pt/TiO ₂ /SiO ₂ /Si yüzeyler üzerinde 750 °C’ de tavlanan SBT ince filmin C-V eğrisi.....	49
Şekil 5. 5. Pt/TiO ₂ /SiO ₂ /Si yüzeyler üzerinde 750 °C’ de tavlanan SBT ince filmin voltaja bağlı kaçak akım yoğunluğu.....	50
Şekil 5. 6. (a) depolama sonrasında (b) tavlama sonrası Pt/SBT arayüzeyinin morfolojik değişimi	52
Şekil 5. 7. (a) depolandıktan sonra (b) 600 °C (c) 800 °C’ de tavlanan Pt üst elektrotlu Pt/SBT/Pt/SiO ₂ /Si kapasitörün kaçak akım-voltaj karakteristiği.....	53
Şekil 5. 8. 750 °C’ de tavlanan ekstra bizmut miktarlı SBT ince filmin SEM görüntüsü	54
Şekil 5. 9. 750 °C’ de tavlanan ekstra bizmut miktarlı SBT ince filmin histerise eğrisi.....	55
Şekil 5. 10. 750 °C’ de tavlanan ekstra bizmut miktarlı SBT ince filmin kaçak akım yoğunluğu	56
Şekil 5. 11. 750 °C’ de tavlanan eksik Sr miktarlı SBT ince filmin SEM görüntüsü	57
Şekil 5. 12. 750 °C’ de tavlanan eksik Sr miktarlı SBT ince filmin P-V grafiği.....	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3. 3. 1. PZT ve SBT ince filmlerin özellikleri.....25

1. GİRİŞ

Ferroelektrik kristaller harici bir elektriksel alanın yokluğunda bile kendiliğinden (spontaneous) elektriksel kutuplanmanın varlığı ile karakterize edilebilen, akıllı, çok fonksiyonlu, lineer olmayan dielektrik malzemelerdir. Ferroelektriklik ilk olarak Rochelle tuzu ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) olarak bilinen malzemelerin anormal dielektrik özelliklerinin araştırılması esnasında 1921’ de J. Valasek tarafından keşfedildi (Valasek, 1921). Valasek’ in yapmış olduğu deneylerde ferroelektrik malzemelerin dielektrik özelliklerinin birçok açıdan demirin ferromagnetik özelliklerine benzediğini göstermiştir. Ferroelektrik malzemeler piezoelektriklik, pyroelektriklik, anahtarlanabilir kutuplanma ve lineer olmayan dielektrik davranışları dahil olmak üzere fonksiyonel özellikleri geniş bir spektrum sergiler. Bu özellikler arasında en önemli olanları ferroelektriklik, piezoelektriklik ve pyroelektriklik.

Ferroelektriklik (ferroelectricity): Dışardan uygulanan elektriksel alan ile kendiliğinden kutuplanmanın olduğu ve bunun anahtarlanabilme yeteneğidir (Strukov ve Levanyuk, 1998). Bu şekilde döndürülebilir her duruma karşılık ikili sayı sistemin “1” ve “0” durumları elektronik olarak kodlanabilir. Kendiliğinden kutuplanma bütün ferroelektrik kristallerin temel bir özelliğidir. Bu özelliğinden dolayı en popüler uygulama alanı uçucu olmayan (Kaybolmayan) ferroelektrik rastgele erişim bellekleridir (non-volatile ferroelectric random access memories). FERAM’ ın işlevi ferroelektrik malzemelerin kalıcı (remanent) kutuplanması üzerine dayanır. Bunlar kararlı hafızalar olup güç kaynağı kesildiğinde bile bilgiyi saklayabilme özelliğine sahiptirler.

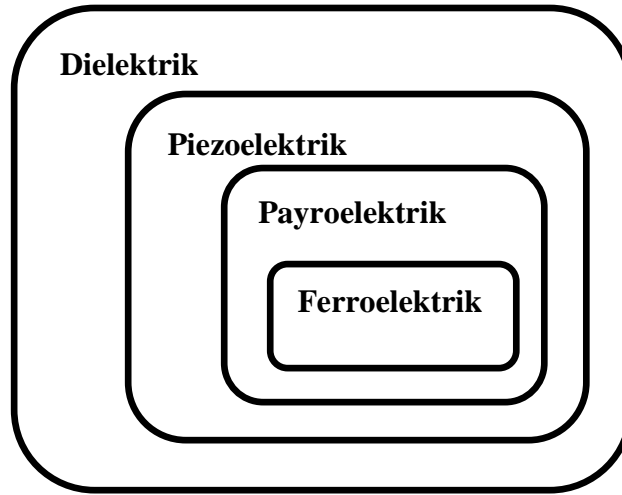
Piezoelektriklik (piezoelectricity): Mekaniksel bir stressin (zorlama) uygulanmasıyla bir voltaj üretebilme yeteneği veya bir voltaj uygulayarak straini (zorlanma) değiştirebilme yeteneğidir. Diğer bir deyişle uygulanan basınç numunenin iki yüzeyi arasında bir potansiyel fark olarak görülen bir kutuplanmaya sebep olur. Buna piezoelektriklik denir. Piezoelektriksel etki gösteren malzeme aynı zamanda bunun tersini de gösterebilir. Eğer malzeme bir elektriksel alan içine konulursa boyutları değişir ve zorlanmış olur. Bütün pyroelektrik kristaller aynı zamanda piezoelektriktirler fakat tüm piezoelektrik kristaller pyroelektrik değildir (Nye, 1990). Ferroelektrik durumundaki bütün kristaller aynı zamanda piezoelektriktirler.

Pyroelektriklik (pyroelectricity): Isıtıldığında veya soğutulduğunda akım üretebilme yeteneğidir. Yüksek sıcaklıklarda dönebilen kutuplu moleküller içeren moleküller ortaya

çıkar; eğer soğutulurken dönme durdurulursa dipol momentler sürekli elektrik kutuplanması vermek üzere yönelirler. Payroelektrik kristaller harici uygulanan bir dış elektriksel alan yokken bile kendiliğinden bir elektriksel kutuplanmaya sahiptirler. Eğer bu kutuplanmanın yönü dış bir elektriksel alan ile tersine çevrilirse böyle kristallerin ferroelektrik davranışı gösterdiği söylenir. Ferroelektrik malzemeler, sadece malzemenin karakteristik özelliği olan belirli bir sıcaklığın aralığında payroelektriktirler (Lang, 1974).

Geçmişte birçok ferroelektrik malzeme piezoelektrik ve payroelektrik özelliklerinden dolayı kullanılmışlardır, fakat son yıllarda ferroelektriklere mahsus özelliklerinden dolayı diğer uygulamalarda göz önüne alınmaktadır. Mikroelektronik teknolojisinde, kullanılan hacim ön sıraya alındığından ferroelektrikler bu teknolojiye önemli rol oynamaktadır.

Ferroelektrikler lineer olmayan yüksek dielektrik sabitli yalıtkanlardır, piezoelektrik ile payroelektrik malzemelerin bir alt grubunu oluştururlar (Şekil 1. 1).



Şekil 1. 1. Ferroelektrik, piezoelektrik ve payroelektrik malzemelerin sistematik gösterimi

Bu özellikleri bakımından ferroelektrik malzemeler uçucu olmayan ferroelektrik rastgele erişim bellekleri (NVFeRAM), mikro-elektromekaniksel sistemler(MEMs), kızılötesi (infrared) dedektörler, optiksel modülatörler, piezoelektrik sensörler ve yüksek dielektrik sabitli kapasitörler gibi birçok teknolojik uygulama alanında önemli bir yere sahiptirler. En yaygın olarak bilinen ve teknolojik uygulamalarda kullanılan ferroelektrikler Baryum Titanat ($BaTiO_3$) ve Kurşun Zirkonyum Titanat (PZT) gibi perovskit yapılı ve Stronsiyum Bizmut Tantalat ($SrBi_2Ta_2O_9$), Stronsiyum Bizmut Niyobat ($SrBi_2Nb_2O_9$) gibi bizmut tabaka yapılı perovskit benzeri malzemelerdir. Aygıt uygulamaların (kapasitör: Metal-Ferroelektrik-Metal

(MFM) ve alan etkili transistörlerde M-FE-Yalıtkan(I)-Yarıiletken(S) (MFIS)(FET)) çoğunda ferroelektrikler ya bulk seramikler ya da tek kristaller veya polikristal ince film dielektrik malzeme olarak kullanılırlar (Dawber ve ark., 2005; Izyumskaya ve ark., 2007).

İnce film şeklinde kullanılan ferroelektrik malzemeler özellikle uçucu olmayan rastgele erişim bellek (NVFeRAM) uygulamaları için anahtarlanabilir yük depolamasına ilaveten yüksek hızda erişim, hızlı okuma/yazma, düşük çalışma voltajı, uçucu olmama ve geniş depolama kapasitesi gibi kullanışlı özellikler sağlamasından dolayı oldukça ilgi çekicidir (Scott, 1998).

Ferroelektrik malzemelerin alanı teknolojik gelişmelere ilaveten akademik çalışmalarda da önemli ilerlemeler göstermiştir. Günümüzde cep telefonları ve dizüstü bilgisayarları gibi modern taşınabilir elektronik cihazlara ilginin yoğun olmasından dolayı uçucu olmayan belleklere hızlı bir talep artışı olmuştur. Genel olarak bellekler, elektronik bilgi depolama üniteleridir. Kullandığımız elektronik cihazlar olan başta bilgisayarlar, cep telefonları, dizüstü bilgisayarları, hesap makineleri ve televizyon gibi cihazlarda bellekler kullanılmaktadır. Son yıllarda teknolojik büyümenin olağanüstü hızı veri (data) toplama cihazları gibi ilgili donanıma ilaveten, bilgisayar donanım ve yazılımında da önemli gelişmelere yol açmıştır (Bechhoefer, 2007). Bu yüzden ferroelektrik ince filmler özellikle uçucu olmayan rastgele bellek uygulamaları için geniş bir depolama kapasitesi ve hasarsız okuma ve sınırsız yazma işlemleri için geniş bir şekilde araştırılmaktadır. Yapılan araştırmaların büyük bir çoğunluğu dinamik rastgele erişim bellekleri (DRAM), uçucu olmayan ferroelektrik rastgele erişim bellekleri (NVFeRAM) ve metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken alan etkili transistörler (MFISFET) üzerine dayanır. Yapılan çalışmalarda polikristal ince film dielektrik malzeme şeklinde kullanılan ferroelektrik malzemelerin elektriksel ve fiziksel özelliklerinin tek kristallere göre farklılıklar sergilediği, katkılanma (doping), zerrelerin boyutu ve biçimine, yapısal kusurlar gibi parametrelere bağlı olduğu tespit edilmiştir (Damjanovic, 1998).

Herhangi bir malzemenin performansı sentezleme ve üretim metodlarıyla yakından ilişkilidir. Ferroelektrik malzemelerin sentezleme metodu bu malzemelerin mikroyapısal ve elektriksel özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynar (Arlt, 1990). Mevcut çalışmalarda kullanılan ince film üretim teknikleri (i) magnetron saçtırma, atmalı lazer depolama (PLD) ve elektron demeti buharlaştırma gibi yöntemleri içeren fiziksel buhar depolama metodu (PVD); (ii) metal organik kimyasal buhar depolama (MOCVD) ve atomik katman depolamayı

kapsayan kimyasal buhar depolama metodu (CVD); (iii) sol-jel ve Langmuir-Blodgett' i içeren kimyasal çözelti metodları (CSD) olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır. Sol-jel, MOCVD, magnetron saçırma ve PLD yöntemleri mevcut çalışmalarda kullanılan ince film depolama teknikleri arasında en popüler olanlarıdır. Bunların arasında sol-jel tekniği diğer üretim tekniklerine göre uygun homojenlik, stokimetrisinin kolay kontrolü, geniş depolama alanı ve kompleks oksit filmlerin kolay üretimi gibi avantajlar sağlar (Guo ve ark., 2007).

Teknolojik uygulamalarda kullanılan cihazların çoğu için ferroelektrikler silikon (Si) yarıiletkeni üzerine elektrotlar ve tampon (buffer) malzemeler ile sisteme ince film olarak entegre edilirler. Eğer bir ferroelektrik film silikon yarıiletken yüzeyi üzerine doğrudan depolanırsa, genellikle film ve silikon arasında iyi arayüzey özelliklerini elde etmek oldukça zordur. Çünkü her iki malzemeyi oluşturan elementler birbirleri ile kolayca etkileşimde bulunabilirler. Arayüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla bir tampon (buffer) tabaka genellikle silikon altlığı ve ferroelektrik malzeme arasına yerleştirilir (Ishiwara, 2000).

Ferroelektrik ince filmler özellikle perovskit yapısıyla kullanılan ferroelektrik malzemelerin elektronik cihazların ömrünü etkileyen yorulma ve kaçak akım gibi bellek özelliklerini ve ticari uygulamalarını olumsuz yönde etkileyen durumlara maruz kaldığı bilinmektedir. Ferroelektrik yorgunluk (fatigue) iki kutuplu (bipolar) anahtarlanma döngülerinin sayısının bir fonksiyonu olarak bir ferroelektrik malzemede döndürülebilen kalıcı kutuplanmanın kaybı olarak tanımlanır. Son yıllarda SBT gibi bizmut tabakalı perovskit benzeri ferroelektrikler ihmal edilebilir yorulma, düşük anahtarlanma voltajı ve metal elektrotlar üzerinde bile düşük kaçak akım yoğunluğu gibi çok cazip özelliklerinden dolayı FeRAM uygulamaları için ilgi çekici hala gelmiştir (Yan ve ark., 2012).

Ferroelektrik ince filmlerde en önemli problemlerden biri olan gerçek kaçak akımı ölçmek oldukça zordur. Kaçak akımın büyüklüğü ferroelektrik ince film kapasitörlerin uygulamaları için fazla güç tüketimi, cihazların ısınması ve işlevsel bozukluklar (uçucu olmayan belleklerin bilgi tutma süresi azalması) ile doğrudan ilişkilidir (Hu ve Krupanidhi, 1994). Kaçak akım ölçümü bir dielektrik ince filmin yalıtkanlık kalitesini belirleyen bir elektriksel yöntemdir. Fakat kaçak akım tek başına ince filmin güvenilirliğini doğrudan belirlemeye yetmez. İnce filmin kalitesini ve güvenilirliğini etkileyen diğer bileşenler şunlardır: kristal yapı, mikroyapı, yüzey morfolojisi, kompozisyon bütünlüğü, film/altkatman ve film/elektrot arayüzeyi. Elektronik cihazların güvenilir çalışması için ince filmin özgün yapısı, mikroyapısı, arayüzeyi ve yüzey morfolojilerinin en uygun şartlarda oluşum şartları

karşılmalıdır ve bu gereksinimleri karşılamak için numunenin mikroyapısal ve yüzey morfoloji özellikleri karakterize edilmelidir (Cole ve ark., 2000).

Son yıllarda ince film şeklinde kullanılan ferroelektrik malzemeler elektronik cihazlar için minimize boyut ve geliştirilmiş performans gibi kullanışlı özellikler sağlamasına rağmen hala mikroelektronik cihazların fabrikasyonu ile ilgili bazı sorunlar var olmaya devam etmektedir (Zhou ve ark., 2012). Ferroelektrik ince filmlerin elektriksel özellikleri prekürsor çözelti kimyasına, yüzeyin doğasına, film kalınlığına ve ısıl işlemler dahil filmlerin hazırlanması esnasında bazı süreç parametrelerinden etkilenen filmin mikroyapısına bağlıdır (Haiyan, 2009). Son yirmi yılda yapılan çalışmalar ekseriyetle gelişen teknolojik uygulamalarda cihaz işlevini yöneten ince film ferroelektrik malzemelerin kimyasal bileşimlerini, mikroyapılarını, kapasitör içindeki entegrasyon süreçlerini ve elektriksel özelliklerini inceleyerek malzeme özelliklerini geliştirmeye ve iyileştirmeye yöneliktir. Özellikle tanecik serbest yük taşıyıcıları, kristal kusurları ve safsızlıklar ile bunların etkileşimi bu tür elektronik malzemelerin aygıt uygulamalarında elektriksel özelliklerin belirlenmesinde etkin rol oynarlar (Moller, 1991). Entegre devre üretimi öncesi ferroelektrik ince filmlerin elektriksel özelliklerinin nasıl kontrol edileceği FeRAM' ların güvenilebilirlik problemlerinin en önemlilerinden biridir.

Elektronik cihazlarda kullanılan ferroelektrik ince film malzemelerin mikroyapıları, yüzey morfolojileri ve film/elektrot arayüzeyinin karakteristikleri onların elektriksel ölçümlerinin anlaşılmasında ve ortaya konmasında oldukça önemlidir. FeRAM gibi mikroelektronik uygulamalarda kullanılan ferroelektrik ince filmlerin elektriksel özellikleri kutuplanma-gerilim (P-V) , akım-gerilim (I-V) ve kapasitans-gerilim (C-V) gibi ölçümlerle karakterize edilir. Kapsamlı bir I-V çalışması diğer elektriksel ve ferroelektrik ölçümler olan C-V ve P-V ile birlikte değerlendirildiğinde yük taşıyıcılarının hareketinin ve onların örgü kusurları, safsızlıklar, zerre sınırları ve elektrot arayüzeyleri gibi diğer etkiler ile birleştirilmesiyle bunların mikroskobik bir görünümünü anlatır (Hu ve Krupanidhi, 1994).

Bu çalışmanın amacı, mikroyapısal etki faktörlerinin açıklanması ile ferroelektrik malzemeler kullanılan elektronik cihazların eşdeğer devrelerinin doğru tasarımı ve bunun yanı sıra ferroelektrik kapasitörlerin elektriksel ölçüm sonuçlarından malzeme özelliklerini doğru yorumlamaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Sol- jel yöntemiyle Pt/Si altlık üzerinde depolanan BST ($Ba_xSr_{1-x}TiO_3$, BST) ince filmlerin yapısı, mikroyapısı ve dielektrik özellikleri üzerinde tavlama sıcaklığı ve kimyasal bileşiminin etkileri araştırılmıştır. Kristallenme, zerre boyutu ve dielektrik özellikler arasındaki ilişki belirlenmiştir. Beklendiği gibi artan işlem sıcaklığı ile kristallenme ve zerre boyutlarının arttığı tespit edilmiştir (Levasseur ve ark., 2013).

Cai ve ark. (2011) hafniyum katkılı $Ba[Zr_{0.2}Ti_{0.8}]O_3$ seramiklerin kristal yapısı, yüzey morfolojisi, dielektrik ve ferroelektrik özelliklerini araştırmışlardır. Hf miktarının artırılması ile kalıcı kutuplanma değerinin arttığı ve daha sonra azaldığı görülmüştür. Buna bağlı olarak zorlayıcı alan değerinin de önce azaldığı daha sonra arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda kalıcı kutuplanma, doyum polarizasyonu ve zorlayıcı alanların ölçüm sıcaklığının artmasına bağlı olarak azaldıklarını tespit etmişlerdir.

Bozgeyik ve ark. (2009) Pt/Ti/SiO₂/Si yüzeyler üzerinde sol-jel spin kaplama metoduyla sentezledikleri % 5 ve 7 mol BaZrO₃ (BZ) katkılı SBT ince filmlerin kristallenme kalitesi, yüzey morfolojisi, yüzey ve iç kimyasal bileşimleri gibi etkenlerin ferroelektrik ve elektriksel özellikleri nasıl etkilediğini konu alan bir çalışma yapmışlardır. SEM görüntülerinden filmlerin BZ eklenmesiyle daha ufak zerre boyutu ve daha büyük gözeneklilik sergilediği görülmüştür. Katkılı filmlerde kalıcı kutuplanma ve dielektrik sabiti değerlerinde azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. BZ katkılı filmlerin kalıcı kutuplanmasındaki azalmanın TaO₆ oktahedradaki daha az burkulmaya yol açan perovskite örgüdeki büyük iyonik yarıçapına atfedilmiştir. Elde edilen verilerden dielektrik sabiti ve kaçak akımı ilişkilendirerek düşük dielektrik sabitli BZ katkılı SBT ince filmlerde daha yüksek kaçak akıma yol açtığı bulunmuştur.

Farklı atmosfer ortamlarının elektriksel özelliklerini nasıl etkilediğini konu alan bir araştırmada statik havada tavllanmış lantan katkılı Bi₄Ti₃O₁₂ ince filmlerin zerre boyutu, kristal ve yapısal kusurlarındaki farklılıklardan dolayı oksijen atmosferinde tavlanan filmlerden daha yüksek bir dielektrik sabiti gösterdiği bildirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan oksijen atmosferindeki tavlama ile yük tuzaklarının ve gevşeme olaylarının artabileceğini önerdiler. Ayrıca statik havada tavllanmış filmler için gözlenen düşük kaçak akımın zerre boyutu, yoğunluğu ve kristallenmedeki farklılıklar nedeniyle yüzey yapısındaki farklılıklara bağlı olabileceği tahmininde bulunulmuştur (Simões ve ark., 2008).

Sol-jel tekniği ile La^{3+} (BLT) ve Nd^{3+} (BNT) aşılı (doping) $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ince filmlerin yorulmama (fatigue-free) ve mikroyapısal özelliklerini incelemek için yapılan bir çalışmada ince filmlerde zerre boyutlarının 50-100 nm arasında olduğunu ve bunların saf BTO' nun (2 μm) zerre boyutundan çok daha küçük olduğu gözlenmiştir. Uzay yüklerinin, zerre boyutunun ve oksijen boşluklarının ferroelektrik ince filmlerde yorulmaya neden olduğu düşünülmüştür. Bundan dolayı BLT' lerdeki oksijen boşluğunun az olması bu filmlerde yorulma olmamasına neden olduğu bulunmuştur. Ayrıca BNT' lerde kalıcı polarizasyon artışı da Nd' un ve La' a göre daha küçük iyonik yarıçaplı olmasından kaynaklanan Ti-O oktahedralindeki burkulmaya bağlanmıştır (Meiya ve ark., 2008).

Perovskit yapılı $\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x\text{TiO}_3$ ince filmlerin kaçak akım davranışı, yapısal özellikleri ve ferroelektrik özellikleri üzerine yapılan çalışmada küçük gözenekler (pinholes) ve mikro çatlaklarla ilişkili olarak, ince filmlerin farklı baryum iyonlarının miktarının artırılmasıyla yüzey morfolojisinin daha pürüzsüz ve daha yoğun bir yapı sergilediği görülmüştür. Elde edilen verilerden ortalama zerre boyutunun küçülmesiyle yüzey pürüzlülüğünün de azaldığı doğrulanmıştır. Buradaki difüzyon tipli ferroelektrik faz geçişinde yüksek difüzyon karakterinin küçük boyutlu zerrelere ve yerel yapısal düzensizlik etkisine bağlanmıştır (Pontes ve ark., 2008).

Simões ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada lantan aşılı farklı alt elektrotlar üzerinde depolanan $\text{Bi}_{3.25}\text{La}_{0.75}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ince filmlerin yapısal, mikroyapısal ve elektriksel özelliklerini dikkate alan bir çalışma yapmışlardır. LNO üzerinde büyütölen filmler, LSCO ve RuO_2 elektrotlar üzerinde büyütölen filmler ile karşılaştırıldığında daha büyük bir zerre boyutuna sahip olduğunu gözlemlədiler. LSCO üzerine büyütölen BLT filmlerin yüzey pürüzlülüğü LNO ve RuO_2 üzerinde depolanan filmler ile kıyaslandığında daha büyük yüzey pürüzlülüğü sergilediğini tespit ettiler. Bu durumun zerrelere plaka biçimli morfolojisinde dolayı olabileceği tahmininde bulunmuşlardır. Bu sonuçlardan alt elektrotların filmlerin yüzey pürüzlülüğü ve zerre boyutunu etkilediğini bulmuşlardır.

Hsu ve ark. (2007) kristallenme, faz oluşumu, mikroyapı, domain yapısı ve elektriksel özellikler üzerinde hem kalınlık hem de stressin etkisini araştırmak için tavlanma esnasında iki farklı kalınlık ile SBT ferroelektrik ince filmler üzerinde basınçlı mekaniksel stres ya da bir gerilim uygulayarak incelemişlerdir. 200 nm kalınlığındaki SBT ferroelektrik ince filmlerin nano-zerreler ve büyük çubuk tipli zerrelere oluşmasıyla homojen olmayan bir yapının meydana geldiğini gözlemlədiler. Fakat film kalınlığının artırılmasıyla nano-zerrelere oranında ve ortalama zerre boyutunda bir azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Elde edilen

verilerden tavlama boyunca bir dış stressin uygulanması ile SBT ferroelektrik ince filmlerin mikroyapısında ve oluşan fazlarında farklılıklara yol açtığını bildirmişlerdir(Hsu ve ark., 2007).

Hsu ve ark. (2006) yaptıkları başka bir çalışmada MOD ve spin kaplama tekniklerini kullanarak sentezledikleri $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT) ince filmlerin ferroelektrik özellikleri üzerinde Ta miktarının etkilerini konu alan bir çalışma yapmışlardır. Ta miktarının az olduğu bir SBT numune, stokimetric veya zengin SBT türlerinin bu özelliklerine göre kristalliği, yapısı ve mikroyapısının üstünlük sergilediğini gözlemlemişlerdir. Bu sonuçlardan SBT numunelerin fiziksel özellikleri üzerinde Ta oranına güçlü bir şekilde bağlı olduğunu bildirmişlerdir. Ta boşluklarının birleşmesiyle SBT filmlerde Ta eksikliğinin kristallenmelerini ve mikroyapılarını iyileştirmede önemli bir rol oynayabileceğini önermişlerdir.

Ta (tantalyum) yerine tungsten' in aşılandığı SBT ferroelektrik seramiklerin yapısal, dielektrik ve ferroelektrik özelliklerini konu alan bu çalışmada elde edilen sonuçları donor katkısından dolayı yük farklılığını karşılamak için örgü yapısı içinde etkileşen katyonik boşlukların katkısı aracılığıyla tartışmışlardır. Zerrelerin anizotropik ve yönelimlerinin rastgele olduğunu gözlemlemişlerdir. Ortalama zerre boyutunun W (wolframium) miktarının artırılması ile arttığını tespit etmişlerdir. Zerre boyutu ve oksijen boşluklarındaki azalmanın yanı sıra diğer etkilerin kalıcı polarizasyondaki değişim için hesaba katılması gerektiği uyarısında bulunmuşlardır (Coondoo ve ark., 2006).

Chou ve ark. (2003) MOD metodunu kullanarak $\text{Ir/SiO}_2/\text{Si}$ yüzeyler üzerinde depoladıkları $\text{Sr}_{0.8}\text{Bi}_{2.6}\text{Ta}_2\text{O}_{9+x}$ (SBT) ferroelektrik ince filmlerin mikroyapı, dielektrik sabiti ve elektriksel özellikleri üzerinde tavlama sıcaklığının etkisini araştırmışlardır. Tek fazlı SBT ince filmi $450\text{ }^\circ\text{C}$ ' deki gibi düşük bir sıcaklıkta elde etmişlerdir. SBT ince filmlerin histerise eğrisi (P-E) ve dielektrik sabitini kristal ve zerre boyutundaki sürekli bir artıştan dolayı tavlama sıcaklığının artması ile arttığı tespitinde bulunmuşlardır. SBT ince filmlerin kaçak akım yoğunluğu ve dielektrik sabitinin sırasıyla zerre boyutu, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve arayüzey tabakalar aracılığı ile ara difüzyonu belirleyen tavlama sıcaklığına güçlü bir şekilde bağlı olduğunu bildirmişlerdir.

Li ve ark. (2002) yaptıkları çalışmada tavlama sıcaklığının ve zamanın bir fonksiyonu olarak hızlı termal tavlama ve geleneksel tavlama fırını işlemleri altında MOD yöntemiyle depolanan SBT ince filmlerin zerre büyüme davranışlarını incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel verilerin sonucundan ince filmlerin elektriksel ve fiziksel özellikleri olan zerre

boyutu, yüzey pürüzlülüğü, kristalin yönelimi, dielektrik sabiti, kalıcı polarizasyon ve zorlayıcı voltaj değerinin ısıl tavlama sonrası büyük bir oranda etkilendiğini ve tavlama sonrası arttıklarını gözlemlemişlerdir.

Diğer bir çalışmada ise aynı MOD tekniği ile üretilen SBT ince filmlerde Sr miktarının azlığının SBT ince filmlerin elektriksel özelliklerini ve yapısını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Stokimetric Sr içeren filmlerde daha küresel ve daha yoğun zerreler oluştuğunu tespit etmişlerdir. %40 ve üzeri Sr miktarının artırılmasıyla filmler aşırı derecede homojen olmama ve zayıf kristalleme davranışı sergilediğini gözlemlediler. Böylece kalıcı polarizasyonun azaldığını ve bu duruma amorf faz çarpık örgünün neden olduğu bildirilmiştir (Li ve ark., 2001).

Sol-jel yöntemiyle üretilen $Pb(Zr_{0.4}Ti_{0.6})O_3$ ince filmlerin ferroelektrik özellikleri üzerinde zerre boyutunun etkilerinin dikkate alındığı bir çalışmada küçük zerrelili filmlerin büyük zerrelili filmlerden daha yavaş kutuplanma davranışı, kutuplanma çevrimi esnasında kutuplanmanın daha az bozunması ve daha küçük akım yoğunluğu sunduğunu bildirmişlerdir. Büyük zerrelili filmin ise daha dik polarizasyon davranışı, negatif E_c ' nin yüksek değeri ve yüksek kaçak akım yoğunluğu gösterdiğini bildirmişlerdir (Yang ve ark., 2001).

PLD ile $Pt/TiO_2/SiO_2/Si$ yüzeyler üzerinde büyütülen (001) yönelimli SBT ince filmlerin zerre sınırlarındaki mikroyapısal kusurlar ve kaçak akım arasındaki ilişkiyi Zhu ve ark. (2001) araştırmışlardır. Yerleşen strain (zorlama) zıtlıklarını dislokasyon (çıkık) merkezleri etrafında gözlemlemişlerdir. Özellikle yapısal kusurları (kenar dislokasyonları gibi) içeren zerre sınırları ve iletkenlik sağlayan zerreler arası fazlar (001) yönelimli SBT ince filmlerin yüksek kaçak akımı için olası bir sebep olarak görülmüştür (Zhu ve ark. (2001).

MOD metoduyla üretilen SBT ince filmlerin mikroyapıları ve elektriksel özellikleri üzerinde ekstra bizmutun etkisi Li ve ark. (2000) tarafından incelenmiştir. %30 üzerinde fazla bizmut miktarı içeren filmler için ikincil fazların meydana geldiğini gözlemlenmiştir. Kalıcı polarizasyon ve dielektrik sabitinde bizmut miktarının artırılmasıyla ilişkili olarak bir azalma meydana geldiğini bildirmişlerdir. Bu durumun daha ufak zerre boyutundan ve ikincil fazın varlığından kaynaklanabileceğini önermişlerdir. Deneysel verilerin sonuçlarından %10 bizmut fazlalığı ile zerre boyutu, morfolojisi ve elektriksel özellikleriyle ilgili olarak bu miktarın optimum bileşim olduğunu bulmuşlardır.

Metal organik bozulma (MOD) metoduyla üretilen 0 ve %20 mol arasında değişen Mg katkılı $Ba_{0.60}Sr_{0.40}TiO_3$ (BST) ince filmlerin yapısal, mikroyapısal, arayüzey ve yüzey morfoloji özelliklerini incelenmesi üzerine elde edilen deneysel sonuçlardan %5 mol katkılı (doping) BST ince filmlerin tek fazlı, homojen kompozisyonlu ve küçük zerrelili olduğunu %20 mol katkılı filmlerin çok fazlı, iki şekilli (bimodal) bir zerre boyutu dağılımı ile homojen olmayan bir kompozisyon sergilediğini tespit etmişlerdir. İnce filmlerin tanecik boyutundaki azalma ile dielektrik sabitinin, dielektrik kaybın ve kaçak akımın azaldığı bulunmuştur. Elde edilen verilerden Mg katkı konsantrasyonunun filmin yapısı, mikroyapısı ve kompozisyon bütünlüğü üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğunu tespit ettiler (Cole ve ark., 2000).

Pt/SBT/Pt film kapasitör sisteminde yüksek alan etkilerinin dikkate alındığı çalışmada tabakalı perovskit ferroelektrik ince filmlerin yüksek alan etkilerinin filmlerin sentezleme tekniğiyle yakın ilişki içerisinde olduğu ve kaçak akım, bozunma voltajı ve anlık (transient) akım karakteristiklerinin filmlerin mikroyapısından etkilendiği tespitinde bulunmuşlardır (Pingxiong ve ark., 1998).

Stokimetric olmayan SBT üzerine yapılan çalışmada MOD tekniği ile üretilen ince filmlerin faz oluşumu, mikroyapı ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Numunelerin P-E histerise özelliklerinin farklılıklar sergilediği tespit edilmiştir. İnce filmlerde kalıcı kutuplanmanın kristallenme ve zerre boyutuna ve kaçak akımın ise azınlık safsızlık fazına bağlı olduğunu bildirmişlerdir (Cheon ve Kim., 1998).

Pt/SBT' nin arayüzeyindeki morfolojik değişimini dikkate alarak kaçak akımın kökeni, bozulma voltajı ve kapasitansın azalması arasındaki ilişkiyi araştıran Shin ve ark. (1998) tavlama numunelerindeki azalan kaçak akım yoğunluğu ve artan bozunma voltajının Pt/SBT arayüzeyinin pürüzsüz morfolojisinden kaynaklanabileceğini ileri sürdüler. Tavlama sonrasında numunenin giriş (gate) kapasitansı kontak olmayan bölgede Pt/SBT arayüzeyindeki boşluklar vasıtasıyla azalmasına rağmen, ferroelektrik girişinin bellek aralığının böyle boşluklar tarafından etkilenmediğini bildirdiler.

3. MATERYAL

Ferroelektrik malzemeler kendiliğinden polarizasyonun varlığından kaynaklanan cazip özellikler sunan çok fonksiyonlu malzemelerdir. Ferroelektrikliğin en önemli özelliği belirli bir sıcaklık aralığında var olan kendiliğinden polarizasyonun dışarıdan uygulanan bir elektriksel alan ile döndürülebilmesidir. Bu şekilde döndürülebilir her duruma karşılık bilginin okuma ve yazma işlemleri için ikili sayı sistemin “1” ve “0” durumları elektronik olarak kodlanmıştır. Bu özelliğinden dolayı ferroelektrik malzemeler akıllı kartlarda olduğu gibi, bilginin okuma ve yazmanın çok hızlı olabildiği, düşük çalışma voltajlı, uçucu olmayan ve yüksek verimli elektronik bellek yapımında kullanılır. Ferroelektrik malzemeler elektronik endüstrisinin önemli bir sınıfını oluşturduğundan dolayı bilimsel araştırmalarda ve çalışmalarda yoğun araştırma konusu olmaktadır.

3. 1. Ferroelektriklik

Dışardan uygulanan bir elektriksel alanın yokluğunda bile kendiliğinden ortaya çıkan elektriksel kutuplanma ferroelektriklik olarak adlandırılır. Bu özellik ferroelektrik malzemelerin doğasına özgüdür. Dielektrik malzemeler polar ve polar olmayanlar olmak üzere iki kısma ayrılırlar. Polar maddeler içerdikleri moleküllerdeki atomların konumlarından kaynaklanan pozitif ve negatif iyonların yük merkezleri bir noktada çakışmadıklarından kalıcı elektrik dipol momentlerine sahiptirler. Dielektrik malzemeler serbest yük taşıyıcılarının çok düşük yoğunluğu nedeniyle elektriği iletmezler. Bu malzemeler zayıf iletkenler olmasına rağmen uygulanan bir dış elektriksel alan altında kristal örgü içindeki yüklü parçacıkların yer değiştirmesiyle elektrik yük merkezlerinin kayması sonucunda kutuplanabilirler. Buradaki kutuplanabilme kavramı, elektrik alan içine konan maddenin moleküllerine ait elektrik dipol momentlerinin, elektrik alanla aynı doğrultuda yönelmesini ifade etmektedir. Bir dielektriğe elektriksel alan uygulandığında, pozitif yük merkezleri elektriksel alan yönünde, negatif yük merkezleri ise alana zıt yönde hafifçe yer değiştirirler. Uygulanan elektriksel alan malzeme içindeki yük dengesinin bozulmasına sebep olur. Belirgin küçük aralıklı negatif ve pozitif yük merkezi arasında bir dipol oluşur. Elektrik dipolü bir d mesafesinden dolayı ayrılan eşit büyüklükte fakat zıt yüklü iki yükten oluşur. Dipol moment yükler arasındaki yol boyunca $-q$ dan $+q$ ya yönelen \mathbf{p} vektörüyle tanımlanır.

Elektriksel dipol momentini;

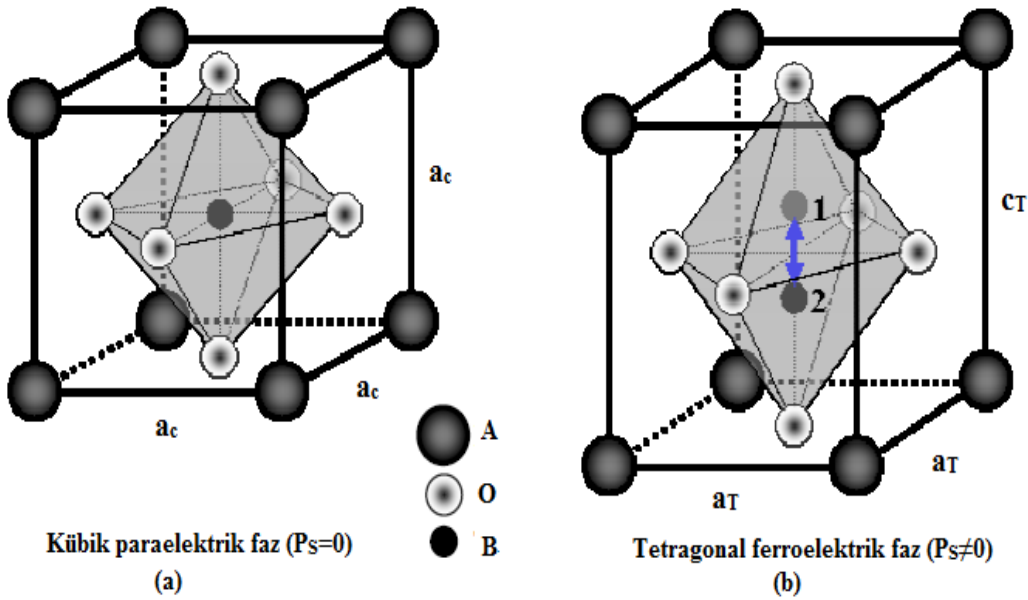
$$\mathbf{p} = q\mathbf{d} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada \mathbf{p} ; numune içerisindeki hacimde meydana gelen elektriksel dipol momentini, \mathbf{d} ; iki yük arasındaki uzaklık, q ; elektriksel yükün değerliğidir. Bu süreç kutuplanma olarak adlandırılır. Kutuplanma birim hacim başına dipol momenttir.

$$\mathbf{P} = \frac{N\mathbf{p}}{V} \quad (3.2)$$

şeklinde verilir. Dipollerin sıraya dizilme derecesi, elektrik alanın büyüklüğüne ve sıcaklığa bağlıdır. Ferroelektrik malzemelerde kendiliğinden (spontaneous) kutuplanma küpün birim hücre içerisindeki pozitif ve negatif yüklerin ayrılmasıyla ortaya çıkar. Sıcaklığın değişmesi, dipol momentin değerinde değiştirir. Böyle kristaller pyroelektrik kristaller olarak tanımlanırlar. Piezoelektrik malzemelerde, kutuplanma, bir stres (zorlama) uygulayarak ve hem de elektrik alanı değiştirerek değiştirilebilir.

En çok bilinen ferroelektrikler için ferroelektrikliğin ortaya çıkması sıcaklığın azalmasının bir fonksiyonu olarak meydana gelir (Şekil 3. 1. 1).



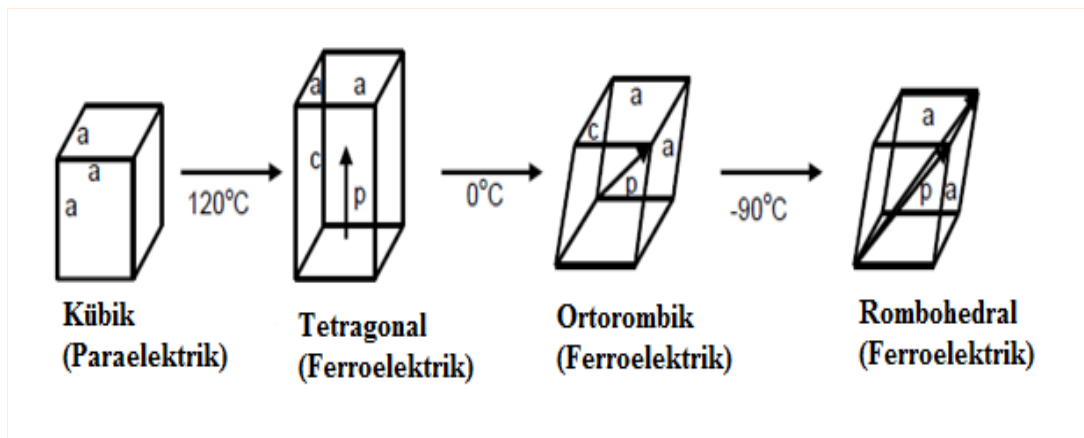
Şekil 3. 1. 1. ABO₃ perovskite yapının (a) paraelektrik ve (b) ferroelektrik fazı (Alkoy, 2006)

Ferroelektriklerin önemli bir özelliği paraelektrik fazdan ferroelektrik faza yapısal bir faz geçişi yapmasıdır. Ferroelektrik faz geçişi birim hücredeki atomların sıcaklığın etkisi ile

yer değiştirmesi suretiyle meydana gelen yapısal bir faz geçişidir ve kendiliğinden kutuplanma ile sonuçlanır. Kendilięinden kutuplanma sıcaklığa bağlıdır ve faz geçiş sıcaklığı üzerinde kaybolur, burada malzemenin paraelektrik (paraelectric) fazda olduğu söylenir. Sıcaklık faz geçiş sıcaklığının altına dūřürüldüęünde kristal yapı hafif bir çarpıklık gösterir, pozitif yük ve negatif yükün merkezi çakışık değildir. Böylece elektriksel dipoller oluşur ve kendiliğinden kutuplanma ferroelektrik fazda ortaya çıkar (Xu, 1991). Ferroelektrik fazdan paraelektrik faza geçiş dielektrik sabiti, kendiliğinden kutuplanma ve termal özellikler gibi kristalin fiziksel özelliklerindeki anormalliklerle ilgilidir. Bu yüzden bir kutuplanma-elektriksel alan (P-E) histerise eğrisi ferroelektrik fazda gözlenir. Bu yapısal bir faz geçişidir ve geçişin türü yer değiştirmeli veya düzenli-düzensiz olabilir.

Yapısal faz geçişi, bir malzemenin kristal yapısı faz geçiş sıcaklığının altında ve üstünde farklılıklar sergiliyorsa oluşmaktadır. Dūřük sıcaklık ferroelektrik fazdaki belirli iyonların yüksek sıcaklık paraelektrik fazda sahip oldukları merkezi simetrik konumdan yer değiştirmelerini içermektedir. Buna yerdeğişimli faz geçişi denilmektedir. Düzenli-düzensiz ferroelektrik faz geçişi esnasında, yüksek sıcaklık paraelektrik fazında düzensiz olan bazı iyonlar dūřük sıcaklık ferroelektrik fazda birim hücrede sıfırdan farklı dipol momenti ile düzenli hale geçer. Yani, düzenli-düzensiz geçişte atomlarda belirli özgül örgü alanlarının rastgele işgalinin yeniden düzenlenmesi her bir atom için oluşurken, yer değiştirmeli geçişlerde atomlar arasındaki bağların küçük yer değiştirmesini gerektirir (Lous ve Pinuaga 2011).

Örneğin, $BaTiO_3$ (Baryum titanat) ferroelektriklerin kristali yer değiştirmeli faz geçişine örnek verilebilir (Şekil 3. 1. 2).



Şekil 3. 1. 2. $BaTiO_3$ ' in (Baryum titanat) kristalografik dönüşümleri (Wang, 2009)

Birden fazla ferroelektrik fazı vardır ve paraelektrik fazı piezoelektrik olmayan ilk ferroelektriktir. Paraelektrik fazının kristal yapısı yüksek simetrlili kübik perovskit' dir. 120 °C nin üzerinde BaTiO₃ kübik perovskit yapıya sahiptir ve paraelektriktir. Birim hücredeki negatif yükün merkezi ve pozitif yükün merkezi çakışmaktadır. Bu yüzden birim hücrede dipol yoktur ve bu yüzden net kutuplanma sıfırdır. Bu sıcaklığın altında yapı bozulur ve (Ba²⁺ ve Ti⁴⁺) ve negatif (O²⁻) iyonların [100] doğrultusu boyunca bağıl yer değiştirmelerinden dolayı tetragonal (a = b ≠ c, α = β = γ=90°) duruma gelir. Yer değiştirme bu şekilde büyürken ona eşlik eden kutuplanma [001] boyunca büyür. Daha düşük sıcaklıklarda, daha düşük simetrlili yapıya, başka bir yer değiştirmeli faz geçişi yapar; -5 °C' nin altında, başlangıçtaki küp doğrultusu [011] boyunca kutuplu olan ortorombik hale gelir. Ve -90 °C nin altında [111] boyunca kutuplu rombohedral olur (Wang, 2009).

Ferroelektrikler için faz geçişi esnasında kristalde meydana gelen değişimi karakterize eden ve fiziksel bir parametre olan düzen parametresi kristal yapısındaki iyonların atomik düzenlenmesiyle oluşan kendiliğinden kutuplanmadır. Ferroelektrik faz geçişleri iki sınıfa ayrılır. Bunlar birinci mertebeli faz geçişleri ve ikinci mertebeli faz geçişleridir. Bu faz geçişlerinin de yer değiştirmeli ve düzenli-düzensiz faz geçiş tipleri vardır. Ferroelektrik geçişleri Landau-Ginzburg teorisi ile tanımlanabilir (Chochran, 1960). Kararlı bir yapı, olabilecek tüm kristal yapılar arasında en düşük iç enerjiye sahip olanıdır. Bu haldeki kristal tek kristal yapısı olarak adlandırılır. Bu durum yapıyı oluşturan atom veya moleküllerin tam bir periyodik düzene sahip olduğu haldir. Ferroelektrik geçişler kristalde kalıcı kutuplanmanın oluşumu ile sonuçlanan geçişlerdir. Landau teorisinin temel ilkesi, serbest enerjiyi minimize edecek polarizasyonun değerini bularak, sıcaklık ve dış etkenlere bağımlılığını belirlemektir. Faz geçişinin türü, faz geçiş sıcaklığında ferroelektriğin Gibbs serbest enerjisinin kısmi türevlerindeki süreksizliği ile tanımlanır. Bir n. mertebeli faz geçişi için, F' nin n. mertebeli türevi geçiş sıcaklığında süreksiz bir fonksiyondur. Kendiliğinden kutuplanma ortaya çıktığında tüm termodinamik parametrelerinin ve dolayısıyla Gibbs potansiyelinin düzen parametresine bağıllığı söz konusudur. F' yi minimize etme koşulunu etkilememesi için, tek dereceli terimler dikkate alınmaz (Damjanovic, 1998).

$$F(T) = F_0(T) + \frac{1}{2}\alpha(T)P_S^2 + \frac{1}{4}\beta(T)P_S^4 + \frac{1}{6}\gamma(T)P_S^6 + \dots \quad (3.3)$$

Burada F₀, P_S=0 olduğunda sistemin elastik serbest enerjisini ifade eder. α, β, γ bilinmeyen katsayılarıdır. Genelde sıcaklığa bağıllıdır ve herhangi bir işarete olabilirler. Düzen parametresi sıcaklığa;

$$\alpha = \alpha_0(T - T_0) \quad (3.4)$$

şeklin de bağlıdır. Burada α pozitif bir sabittir ve T_0 , geçiş sıcaklığına eşit veya ondan düşük bir sıcaklıktır. Herhangi bir T değerinde kendiliğinden kutuplanmanın değeri F' nin minimum şartı ile belirlenir. Faz geçiş sıcaklığında değişimi tanımlayan kendiliğinden kutuplanma aniden yükseldiğinde birinci dereceli faz geçişinden, sıfırdan başlayarak sürekli yükseldiğinde ikinci dereceli faz geçişinden söz edilir. İkinci dereceli faz geçişlerinde kendiliğinden kutuplanmanın sürekliliği demek faz geçiş noktası yakınlığında onun çok küçük değerlere sahip olması ve F' nin kendiliğinden kutuplanmanın derecelerine göre seriye dizilebilmesi demektir (Mikailzade ve San, 2009). F' nin minimum olması için gereken şartlar:

$$\frac{\partial F}{\partial P_S} = 0; \dots \dots \dots \frac{\partial^2 F}{\partial P_S^2} > 0 \quad (3.5)$$

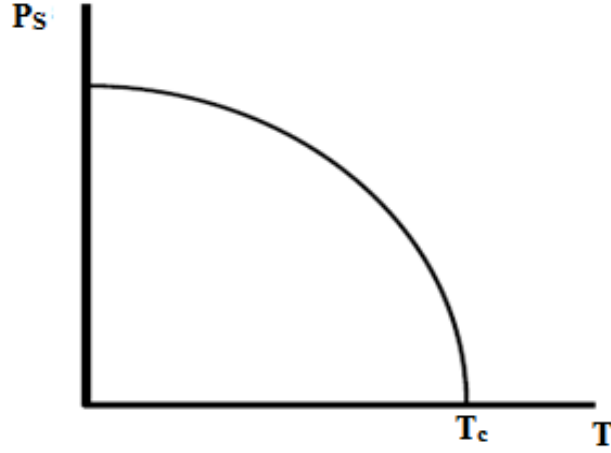
$\beta > 0$ ise γ parametresi ihmal edilebilir. Aksi halde F' nin minimumu $P_S \rightarrow \pm\infty$ a karşılık gelecektir ve bu da fiziksel durum değildir. Pozitif α için F' nin minimum değeri $P_S = 0$ 'da gerçekleşir; negatif α için ise minimum, P' nin belli değerlerinde olur.

$$F(T) = F_0(T) + \frac{1}{2}\alpha(T)P_S^2 + \frac{1}{4}\beta(T)P_S^4 \quad (3.6)$$

Buradan:

$$P_S = 0 \text{ veya } P_S^2 = \alpha_0(T_0 - T)/\beta \quad (3.7)$$

olur. Bu durumda faz geçişi süreklidir. Geçiş sıcaklığında, kutuplanma sürekli bir azalma göstererek sıfıra gideceğinden, bu durumda geçişin türü ikinci mertebededir (Şekil 3. 1. 3). Faz geçişi $T_c=T_0$ da oluşur. Kristaller ikinci tür faz geçişlerinde bir histerise eğrisi göstermez. Bunun sebebi faz geçişinin sürekli bir şekilde meydana gelmesidir.



Şekil 3. 1. 3. II. tür faz geçişlerinde kutuplanmanın sıcaklıkla değişimi (Xu, 1991)

Şimdi ikinci türevin kesintiye uğradığı birinci derece faz geçişlerine bakalım. Termodinamik potansiyelde eğer β sabiti negatif ise ($\beta < 0$) kristalin minimum enerjiye sahip olduğu durum bozulur. Bu sebeple termodinamik potansiyele altıncı derece terimi de eklemek gerekir. Bu durumda Landau serisi;

$$F(T) = F_0(T) + \frac{1}{2}\alpha(T)P_S^2 + \frac{1}{4}|\beta|(T)P_S^4 + \frac{1}{6}\gamma(T)P_S^6 + \dots \quad (3.8)$$

Aynı şekilde minimumluk koşulundan;

$$\frac{\partial F}{\partial P_S} = 0; \dots \dots \dots \frac{\partial^2 F}{\partial P_S^2} > 0 \quad (3.9)$$

Birinci şartın uygulanması ile;

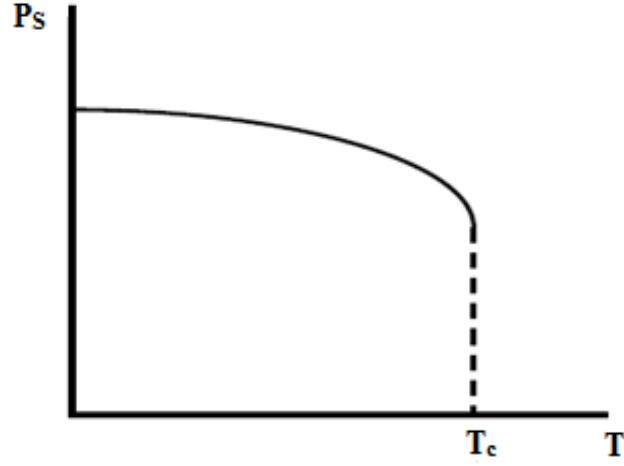
$$\frac{\partial F}{\partial P_S} = 0 = (\alpha + |\beta|P_S^2 + \gamma P_S^4)P_S \quad (3.10)$$

elde edilir.

Kendiliğinden faz geçiş sıcaklığı ifadesi;

$$P_S^2 = -\frac{3|\beta|}{4\gamma} \quad (3.11)$$

olarak elde edilir. Bu sonuç faz geçiş sıcaklığında kristalin kendiliğinden polarizasyon değerinin belli bir değerden itibaren sıcaklık azaldıkça arttığını ifade eder (Şekil 3. 1. 4). Bu durum faz yapısı değişiklikleri gibi kristaldeki biçim bozulması nedeniyledir.



Şekil 3. 1. 4. I. tür faz geçişlerinde kutuplanmanın sıcaklıkla değişimi (Xu, 1991)

Ferroelektrik ve paraelektrik durumlar arasındaki birinci dereceden bir faz dönüşümünde bir ferroelektrik geçiş sıcaklığında doyum polarizasyonunun süreksiz değişimi ile ayırt edilebilir. Ferroelektrik kristalin serbest enerjisinin polarizasyon ile değişimi incelenecek olursa faz geçiş sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda kristalin serbest enerjisinin minimumu $P_s=0$ ' da olacağı açıktır.

Ferroelektriklerde Curie noktası üzerindeki dielektrik sabitinin sıcaklığa bağlılığı Curie-Weiss yasası ile tanımlanır.

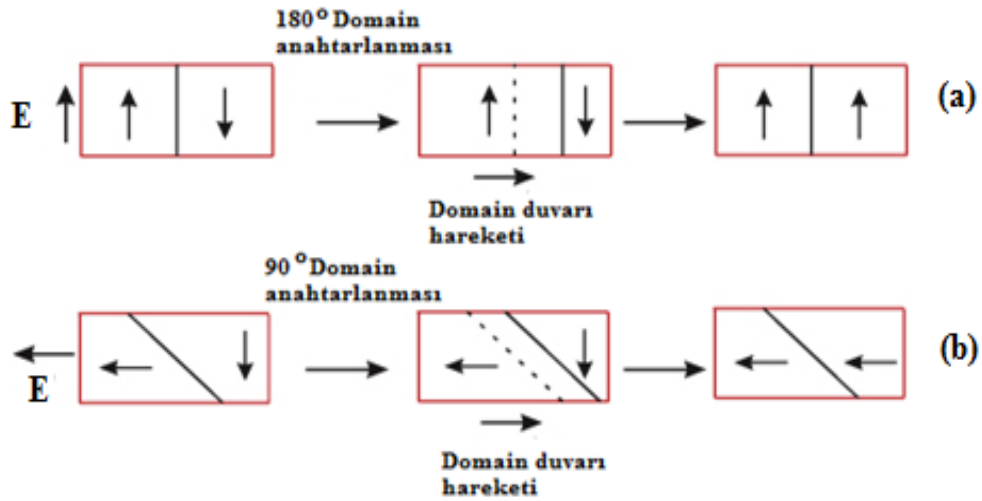
$$\epsilon = \epsilon_0 + \frac{C}{T-T_0} \quad T > T_0 \quad (3.12)$$

Burada C; Curie sabitidir ve T_0 ($T_0 \leq T_c$) Curie-Weiss sıcaklığıdır. $T_0=T_c$ olduğunda ikinci dereceden bir faz geçişi meydana gelirken, $T_0 < T_c$ olduğunda birinci derecen bir faz geçişi meydana gelir (Xu, 1991). Curie sıcaklığı normal şartlarda malzemenin maruz kalacağı sıcaklık değerlerinin oldukça üzerinde olmalıdır, aksi halde sıcaklık parçacıkların dizilişini değiştirir.

Ferroelektrik kristallerde dielektrik sabiti Curie noktası civarında çok büyük değerlere (10^4 - 10^5) sahip olmaktadır. Bu olay dielektrik anormalliği olarak bilinmektedir. Bu durum faz yapısı değişiklikleri gibi kristaldeki biçim bozulması nedeniyledir. Faz geçiş sıcaklığı üzerinde dielektrik sabiti sıcaklığın artması ile hızlı bir şekilde azalır.

3. 2. Ferroelektrik Domain ve Domain Anahtarlanması

Ferroelektriklerde görülen tipik bir olay kristaldeki elastik ve elektrostatik enerjilerin minimizasyonu nedeniyle ferroelektrik domainlerin oluşumudur. Zerre sınırlarındaki elastik enerjiyi minimize etmek için kristal kendi içinde aynı zerre biçimine yol açan benzer domainlere ayrılır. Komşu domainlerde polarizasyon farklı yönde oluşur. Tek düze bir şekilde yönelmiş kendiliğinden polarizasyonlu kristalin bölgesi ferroelektrik domainler olarak adlandırılır ve iki domain arasındaki bölge de domain duvarı olarak adlandırılır. Domain duvarları duvarın her iki tarafındaki kutuplanma yönleri arasındaki açı ile karakterize edilir. Ferroelektrik domain duvarları 1-10 nm mertebesinde dir. Zıt bir şekilde yönelmiş polarizasyon domainleri 180° li, dik olarak yönelmiş polarizasyon bölgesi 90° li duvarlar olarak adlandırılır (Şekil 3. 2. 1).



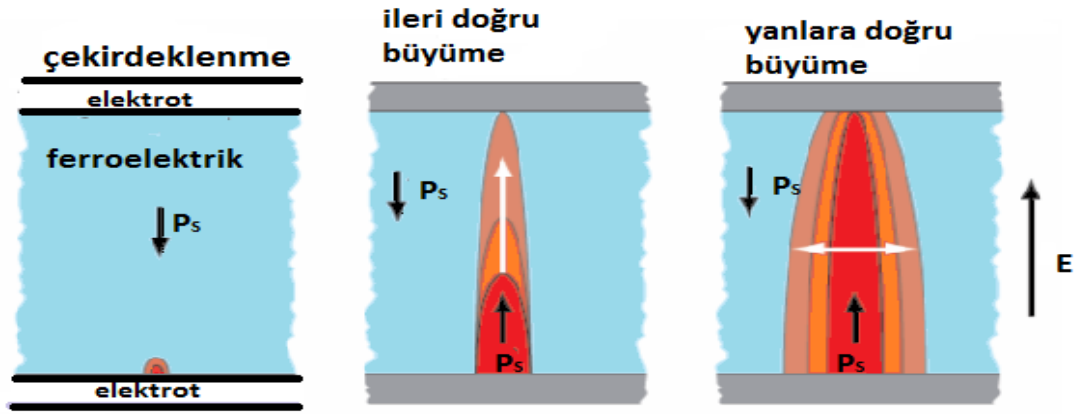
Şekil 3. 2. 1. Bir ferroelektrik kristaldeki (a) 180° ve (b) 90° li domainlerin gösterimi (Bhattacharyya ve Arockiarajan, 2013)

Bir polikristalde (birden daha fazla kristalografik zerrel i kristal) domainlerin düzenlenmesi zerre boyutuna bağlıdır. Zerreler ufak ise ($\ll 1$ mikron) bu durumda genellikle zerre başına bir domain olarak bulunabilir (Kumar, 2012). Daha büyük boyutlu zerrelerde her bir zerrede birden daha çok sayıda domain bulunabilir. Burada belirtmelidir ki ferroelektrik domain duvarı bir polikristal malzeme içindeki zerre sınırları ile karıştırılmamalıdır.

Uygulanan elektriksel alana bağlı olarak domain sınırlarının biçim ve büyüklüğü değişir. Domain duvarı bölgelerinde kutuplanma bir domainden diğerine sürekli ama dik bir şekilde değişir. Domain ve domain duvarı hareketi zerre boyutu, elektriksel alan ve ince

filmin hazırlama koşulları gibi faktörler tarafından etkilenir (Stemmer ve ark., 1995). Domainler ayrıca ferroelektrik kristalde kutuplanma anahtarlanmasına katkı sağlar. İki kalıcı kutuplanma arasındaki anahtarlanma domainlerin büyümesini ve daralmasını gerektirir.

Domainler zorlayıcı alanlardan daha yüksek bir elektriksel alan uygulandığında domainlerin çekirdeklenmesi ve domain duvarlarının hareketi ile sonuçlanır. Domainlerin büyümesi veya daralması kutuplanmaya yol açar. Bir elektriksel alan uygulanmasıyla domain değişiminin evreleri şunlardır: (1) elektrotların kenarlarına yakın yeni ferroelektrik domainlerin çekirdeklenmesi (2) uygulanan elektriksel alana paralel ileri doğru büyüme (3) düzlemsel domain duvarları hareketi (4) denge durumu (Şekil 3. 2. 2) (Dawber ve ark., 2005).



Şekil 3. 2. 2. Dış bir elektriksel alanın uygulanmasıyla domain anahtarlanma mekanizmasının evreleri (Dawber ve ark., 2005)

Ferroelektrik ince filmlerin elektriksel özelliklerinin zerre sınırları, zerre boyutu ve yüzey üzerindeki gözeneklerden etkilendiği bilinmektedir. Ferroelektrik ince filmlerde zerre boyutu uygulanan elektriksel alanın yönüne göre birbirleriyle ilişkili olan domain yapısı ve domain duvarı hareketine katkısı nedeniyle önemlidir. Ferroelektrik malzemelerin anahtarlanma hızı zerre boyutuyla orantılı olan domain boyutuna bağlıdır. Bundan dolayı, zerre boyutu cihazların çalışma performansı açısından önemlidir. Domain duvarlarının hareketinin daha küçük boyutlu zerrelerinkinden daha büyük zerrelerde daha serbest olması beklenir. Çünkü zerre sınırları hareketli duvarlar için ilaveten sabitleme (pinning) noktalarına katkıda bulunacaktır. Anahtarlanma çevrimi esnasında yük kusurları oluşur ve uygulanan elektriksel alan nedeniyle domain duvarlarında tuzaklanırlar. Yük kusurları domainlerin belli bir yönünü kilitleyerek domain yönelimini engeller. Sabitleme ferroelektrik histerise eğrisinin zorlayıcı alan değerini artırır ve ferroelektrik kutuplanmanın

miktarını azaltır. Zerre boyutundaki artış dielektrik sabiti (permittivite veya elektriksel geçirgenlik) artırır ve domain duvarı hareketini daha kolay yapar (Yang, 2001).

Ferroelektrikliğin en önemli özelliği belirli bir sıcaklık aralığında harici bir elektriksel alan uygulayarak var olan kalıcı kutuplanmanın $-P_r$ durumundan $+P_r$ ye çevrilmesidir. Önceki voltajın tersi yönde voltaj bir ferroelektrik kapasitöre uygulanırsa, kalıntı (remanent) domainler anahtarlanacaktır ki kapasitör plakaları üzerinden akmak için dengeleyici bir yük gerektirir. Eğer elektriksel alan önceki uygulanan alanın yönünde uygulanırsa anahtarlanma oluşmaz. Dengeleyici yükte değişiklik meydana gelmez ve bu yüzden kapasitöre yük akış miktarında bir azalma meydana gelecektir. Bu durum bir ferroelektrik bilgi depolama cihazlarında okuma ve yazma durumları için kullanılır (Ramesh, 2001). Örneğin, eğer bir bellek negatif durumunda ise ($-P_r$) pozitif bir anahtarlanma voltajı uygulanmalıdır. Aksi halde pozitif bir durumdaki ($+P_r$) bir bellek hücresine pozitif gerilim uygulandığında anahtarlanma meydana gelmez. Bu şekilde döndürülebilir her duruma karşılık ikili sayı sistemin “1” ve “0” durumları elektronik olarak kodlanmış olacaktır.

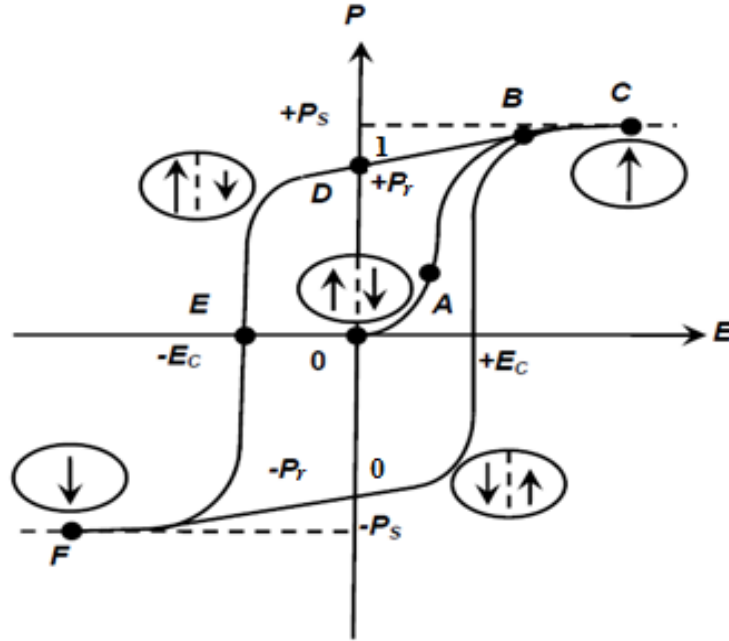
Ferroelektrik malzemelerin temel özelliği sadece kendiliğinden kutuplanmaya sahip olması değil aynı zamanda bu kutuplanmanın dış bir elektriksel alan altında döndürülmesidir. Bellek uygulamalarının temel prensibi ferroelektrik histerise davranışı üzerine dayanır. Kutuplanmanın tersine çevrilmesi olayı döndürülen domainler ve domain duvarı hareketinin merkezci büyümesiyle oluşur. Eğer yatay kristaldeki (hypothetical crystal) pozitif ve negatif domainlerin eşit olduğu kabul edilirse o zaman kristalin net kutuplanması sıfır olacaktır. Bir dış elektriksel alanın uygulanmasıyla kristal polar bir duruma geçebilir.

Kristalin üzerine sıfırdan başlayan ve lineer olarak değişen bir elektriksel alan uygulanırsa içteki kutuplanma (P) elektriksel alanın artırılmasıyla;

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E} \quad (3.13)$$

bağıntısı ile lineer bir şekilde artar ve kristal lineer bir dielektrik (paraelektrik) gibi davranır, çünkü uygulanan elektriksel alan yönüne zıt bir şekilde dönmüş domainlerin anahtarlanması için yeterince büyük değildir. Burada χ dielektriğin elektrik alınganlığı olarak adlandırılır ve makroskobik \mathbf{E} alanı ile \mathbf{P} kutuplanması arasındaki bağıntı χ katsayısı ile sağlanır. Dielektriğin her noktasında P kutuplanma, bileşke E alanı ile aynı yönde ve doğru orantılıdır. Bu lineer bölge döngüdeki OA kısmına karşılık gelir. Uygulanan alanın daha da artırılmasıyla, zıt bir şekilde dönmüş domainler tekrar dönmeye başlar ve kutuplanma bütün

domainlerin elektriksel alanın yönünde sıralanmasıyla hızlı bir şekilde artar. Bu durum ise histerise döngüsünün AB kısmına karşılık gelir.



Şekil 3. 2. 3. Ferroelektrik kristallerde kutuplanma-elektriksel alan değişim grafiği

(Xu, 1991)

Bu bölgede malzemenin polarizasyona tepkisi artık alanın büyük olmasından dolayı lineer değildir. Bütün domainler elektriksel alan yönünde sıralandığında yani tek domain durumu olduğunda kutuplanma doyumuna ulaşmıştır ve doyum kutuplanması olarak adlandırılır (P_s). Bu durum histerise döngünün BC kısmına karşılık gelir. Burada artan elektriksel alan ile tek domain durumu olduğu için polarizasyon yine lineer bir durum sergiler. Uygulanan alan ile alan yönündeki polarize olmuş domain bölgeleri büyür. Ters yönde olanlar ise önce alan yönünde dönmeye çalışır. Uygulanan alan azaltılmasıyla bazı domainler tekrar eski konumlarına döner fakat genellikle kutuplanma sıfır olamaz ve bu kısım döngünün BD kısmına karşılık gelir ve sıfır alanda bile domainlerin bazıları hala pozitif yönde sıralıdır ve kristal kalıcı bir polarizasyon sergiler (P_r). Bu durumda döngünün D kısmına karşılık gelir. Sıfır kutuplanma değerine ulaşmak için kristale zorlayıcı elektriksel alan olarak adlandırılan (E_c) negatif bir elektriksel alanın uygulanmasını gerektirir. Ancak bu yapıldığında kutuplanma sıfır olur (E noktası). Negatif yöndeki alanın daha da artırılmasıyla kutuplanmanın önceki durumunun aksi yönünde yeni yönelimler söz konusudur ve kristal tekrardan F noktasında doyumuna ulaşır. Kutuplanma (P) ve elektriksel alan (E) arasındaki bu ilişki ferroelektrik

kristalin önemli bir karakteristiği olan ferroelektrik histerise eğrisi olarak adlandırılır (Şekil 3. 2. 3).

İdeal bir histerise eğrisi simetriktir, bundan dolayı pozitif ve negatif zorlayıcı alanlar ($|+E_c| = |-E_c|$) ve negatif ve pozitif kalıcı polarizasyonlar ($|+P_r| = |-P_r|$) birbirine eşittir. Kalıcı polarizasyon (P_r) bellek hücrelerinin okuma işlemi esnasında ortaya çıkan yük miktarıyla doğrudan ilişkilidir, yüksek değerleri kapasitör tipli FeRAM' da verinin (data) daha büyük miktarını depolamak için bellek uygulamalarında arzu edilir. Zorlayıcı gerilim depolanan elementin işlem voltajıyla yakından ilişkilidir ve ferroelektrik filmin kalitesine bağlıdır. İdeal bir sistemde zorlayıcı voltaj ferroelektrik ince filmde kutuplanmanın anahtarlanabilmesi için gerekli olan voltajla belirlenir (Meyer ve ark., 2005). Ferroelektrik malzemeler çok yüksek zorlayıcı alanlara sahip olduğundan dolayı bir yönden diğerine domainleri anahtarlayabilmek için bu malzemeleri ince film şeklinde üretmek gerekir. Zorlayıcı elektriksel alan değerinin FeRAM' ın düşük çalışma voltajı için düşük olması tercih edilir (Ishiwara, 2000). Zorlayıcı voltaj domain çekirdeklenmesi ve domain duvarı hareketinin kolaylığı ile ilgilidir. Anahtarlanma akımı verisinden domainin çekirdeklenmesi, büyümesi ve birleşmesi hakkında bilgi elde edilebilir. Anahtarlanma süreci ile ilişkili kristal özellikler domain ve domain duvarlarının hareketliliği ile ilişkilidir ve aynı zamanda elektriksel alan etkisiyle bunların hareketi anahtarlanmada etkin rol oynar.

Ferroelektrik özellikler ferroelektrik domain yapısı, domain çekirdeklenmesi ve domain hareketliliği tarafından etkilenir. Ren ve ark. yaptıkları çalışmada $PbTiO_3$ ince filmlerin TEM görüntülerine dayanarak domain yapısı ve domain duvarı hareketini ferroelektrik ince filmin zerre boyutuyla ilişkilendirmişlerdir. Tek domaine (single-domain) yakın boyutlara sahip zerrelerin bir dış alan altında çok kararlı olduklarını tespit etmişlerdir ki böyle numunelerde domain çekirdeklenmesinin zor olduğu anlamına gelir. Bu nedenle küçük bir kalıcı kutuplanma ufak zerrelilerde beklenir. Diğer bir deyişle çoklu domain (multi-domains) baskın yapıya büyük zerreler sahip olan film büyük kalıcı kutuplanmaya yol açan anahtarlanmasını daha kolay yapar. Yani ferroelektrik özellikler zerre boyutuna güçlü bir şekilde bağlıdır (Ren ve ark., 1997).

Histerise eğrisinin özellikleri ve onun anahtarlanma özelliklerinin kontrol süreci hala tam olarak anlaşılammıştır. Çünkü anahtarlanma kullanılan elektrotların türü, ferroelektrik malzemelerin kalınlığı, ısıl işlemler, numunenin hazırlanma şartları ve kaçak akım gibi birçok etki tarafından etkilenir. Kayıpsız bir ferroelektrik kapasitör için histerise eğrisi

kapasitör boyunca akan yer değiştirme akımının birleştirilmesiyle elde edilebilir. Ferroelektrik malzemelerin histerise eğrisi sıcaklığa çok duyarlıdır. Curie sıcaklığında ve üzerinde kaybolur çünkü malzeme düşük sıcaklıkta ferroelektrik durumundan yüksek sıcaklıkta paraelektrik bir faz geçişine maruz kalır (Damjanovic, 2005). Normal dielektrik durumdaki bir kristale uygulanan elektrik alan önce yavaşça artırılıp sonra azaltıldığında gözle görünür bir histerise eğrisi oluşmamaktadır.

3. 3. Ferroelektrik Malzemeler ve Cihazlar

Ferroelektrikler elektronik endüstrisinde ve bilimsel araştırmalarda kullanılan malzemelerin önemli bir sınıfını oluştırmaktadırlar (Trainer, 2001). Çok yüksek dielektrik sabitine sahip olduklarından dolayı, alışılmış dielektrik malzemeler kullanılarak yapılan kondansatörlerden çok daha küçük boyutta kondansatörler yapılmaktadır. Temel ilgi ferroelektrik malzemelerin polikristal (seramik) ve ince film şeklinindedir. Ferroelektrik malzemeler yüksek dielektrik sabitli kapasitörler, piezoelektrik sonarlar (su altı görüntüleme, dinleme ve haberleşme) ve ultrasonik dönüştürücüler, radyo ve iletişim filtreleri, payroelektrik güvenlik kameraları, tıbbi ultrason ve tahribatsız muayene gibi dönüştürücüler, otomatik ateşleme sistemleri, ultrasonik motorlar (mekatronik), ince film kapasitörler ve ferroelektrik ince film bellekler gibi günümüzde geniş teknolojik uygulama alanına sahiptirler (Haertling, 1999).

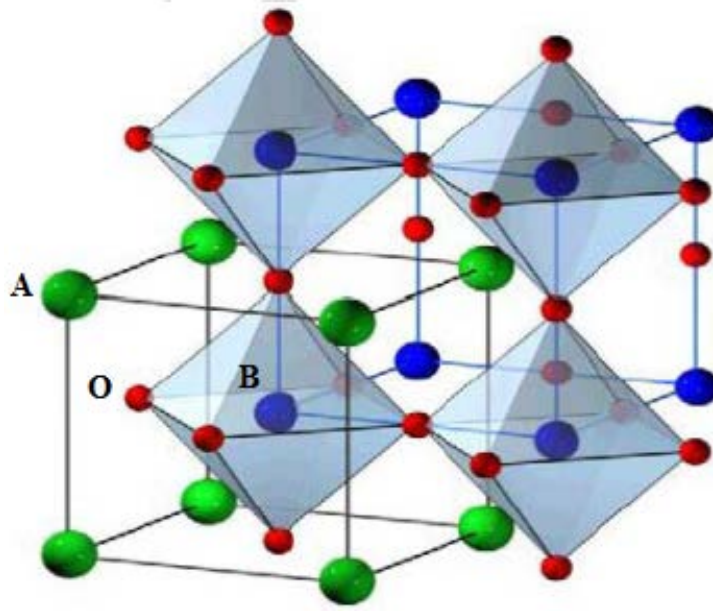
Ferroelektrik malzemeleri yapılarına göre;

1. Köşeyi paylaşan oksijenoktahedra,
2. Hidrojen bağlı kökler içeren bileşikler,
3. Organik polimerler,
4. Seramik polimer bileşikleri olmak üzere dört gruba ayrılır.

Teknolojik uygulamalarda kullanılan ferroelektrik kristallerin geniş bir kısmını oktahedraldeki O^{2-} iyonlarını paylaşan köşeyi içeren sabit oksitler oluşturur. Köşeyi paylaşan oksijen oktahedra, perovskit tipli bileşikler, tungsten bronz tipli bileşikler, bizmut tabaka yapılı bileşikler ve lityum niobat ve tantalat içerir.

Elektronik cihazların yapımında kullanılan ferroelektrik malzemelerin birçoğu Baryum Titanat ($BaTiO_3$), Kurşun Titanat ($PbTiO_3$) ve Kurşun Zirkonyum ($PbZrO_3$) gibi ABO_3 formülüyle karakterize edilen perovskit ailesine aittir. A tek değerli veya iki değerli bir

metal ve B dört ya da beş değerli metaldir, O ise -2 değerlikli oksijen iyonudur. Burada A^{2+} iyonları kübik hücre yapısının köşelerinde, B^{4+} iyonları merkezde ve O^{2-} iyonları küpün yüzey merkezlerinde yer alır (Czekaj ve ark., 2006). Esas olarak bir perovskit yapı şeklinde gösterildiği gibi BO_6 oktahedranın üç boyutlu örgüsüdür (Şekil 3. 3. 1). Bu örgü, A ve O iyonlarının oktahedrik kümeler arasındaki konumlarını dolduran B iyonlarıyla kübik bir sıkı paket dizilimi olarak kabul edilmektedir.



Şekil 3. 3. 1. Kübik ABO_3 perovskit tipli birim hücre (Czekaj ve ark., 2006)

Kübik faz merkezi simetrik bir yapıya sahip olduğu için, polar eksene sahip değildir ve net kendiliğinden kutuplanma sıfırdır. Bir elektriksel alan uygulandığında hem B^{4+} katyonları hem de O^{2-} anyonları denge konumlarından yer değiştirirler. Böylece pozitif ve negatif iyonların her bir çifti bir elektrik dipol momentini olarak düşünülebilir ve kendiliğinden kutuplanma bu dipollerin toplamı olarak ifade edilebilir. Merkezi atomlarının bu hareketi ferroelektrikliğe uygundur. Merkezi atomun bu özelliği ferroelektrik malzemede histerise davranışına sebep olur. Malzeme elektriksel alan sıfır olduğunda bile iki kalıcı $+P_r$ ve $-P_r$ kutuplanmaya sahiptir. Bellek uygulamaları için bu kutuplanma durumları ikili sayı sisteminin “1” ve “0” durumlarına karşılık gelecek şekilde kodlanabilir. “1” ve “0” ikili sayı sisteminde bilgi merkezdeki atomun elektriksel alan ile aşağı yukarı doğru hareketiyle elde edilir. Enerjiye ara verildiğinde atom kendi konumunda kalır ve böylece bellek cihazlarda bilgiler korunur. Bu durum uçucu olmama olarak ifade edilir ve bu özelliğinden dolayı genellikle

FeRAM olarak bilinen bellek hafıza yapımında kullanılır (Scott, 2000). FeRAM harici bir elektriksel alanın yokluğunda var olan elektriksel kutuplanma ile bilgiyi depolamak için ferroelektrik etkinin kullanıldığı bir RAM tabanlı cihazdır.

PZT ve SBT özellikle uçucu olmayan rastgele erişim bellekleri için geniş bir şekilde araştırılır. Ferroelektrik Kurşun Zirkonyum Titanat ($PbZr_xTi_{1-x}O_3$, PZT) uçucu olmayan rastgele erişim bellek uygulamaları için uzunca bir süre en iyi adaylardan biri olarak düşünülmüştür. Fakat Pt elektrotlar üzerindeki PZT ince filmler arayüzeyinde oluşan oksijen boşlukları nedeniyle elektriksel alan döngüleri esnasında şiddetli polarizasyon yorulması (fatigue) sergiler. Son yıllarda bellek uygulamaları için PZT filmlere bir alternatif olarak Stronsiyum Bizmut Tantalat'ın (SBT) kullanımı yaygınlaşmıştır. SBT gibi bizmut tabakalı benzeri ferroelektrikler ihmal edilebilir yorulma, düşük anahtarlanma voltajı ve düşük kaçak akım yoğunluğu gibi cazip uygulamalarından dolayı bellek uygulamaları için ilgi çekici hale gelmiştir (Yan ve ark., 2012). Çizelge 3. 3. 1 PZT ve SBT ince filmlerin özelliklerini göstermektedir.

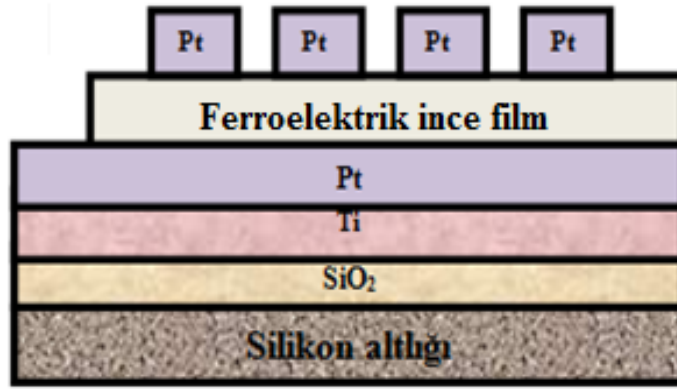
Çizelge 3. 3. 1. PZT ve SBT ince filmlerin özellikleri (Ramesh ve ark., 2001)

Malzemeler	PZT Ailesi	SBT Ailesi
Kristal Yapısı	ABO ₃	Bizmut Tabaka Yapılı
Kristallenme Sıcaklığı (°C)	600 - 700	750 - 850
Anahtarlanma Kutuplanması ($\mu C/cm^2$)	30 - 60	10 - 30
Dielektrik Sabitleri	400 - 1500	200 - 300
Curie Sıcaklığı (°C)	300 - 500	310

Fakat SBT ferroelektrik ince filmler PZT filmlerinkinden çok daha düşük kalıcı kutuplanma değerine sahiptir. Bu önemli dezavantajın üzerinden stokimetric olmayan fazda SBT üretilerek üstesinden gelinmeye çalışılmıştır.

Teknolojik uygulamalarda kullanılan aygıtların çoğu için ferroelektrikler silikon (Si) yarıiletkeni üzerine elektrotlar ve tampon (buffer) malzemeler ile sisteme ince film olarak

entegre edilirler (Şekil 3. 3. 2). FeRAM' lar silikon üzerine işlenmiş çok sayıda transistörün ağırlıklı olarak veri erişiminin kontrolü ve verinin saklanmasıyla ilgili belli işlevleri yerine getirmek amacıyla birbirine bağlanmasıyla ortaya çıkmış ve nispeten daha az karmaşık olan elektronik yapılardır. FeRAM teknolojilerinde süren hedef daha küçük transistörler üretmek ve bu sayede aynı büyüklükte bir silikon parçasına daha fazla transistör yani daha fazla işlev sığdırmak ayrıca silikonun daha hızlı çalışmasını sağlamaktır (www. Sistemakademi. com).



Şekil 3. 3. 2. Metal-ferroelektrik-metal (MFM) yapı

Ferroelektrik bellekler, belleklerin iki farklı türünde kullanılmak için tasarlanmışlardır. Bunlar; kapasitörlü ve transistörlü FeRAM' lardır. Belleklerin alan etkili transistör (FET) türü tahribatsız okuma işlemi ve yüksek yoğunluklu uçucu olmayan belleklerin geliştirilmesi için yüksek bir potansiyele sahiptir. Ferroelektrik bellek alan etkili transistör; metal-ferroelektrik-yalıtkan-yarıiletken (MFIS) ve metal-ferroelektrik-metal-yalıtkan-yarıiletken (MFMIS) yapıları içerir. MFSFET yapısında ince ferroelektrik film bir giriş yalıtkanı olarak silikon yarıiletkeni üzerinde doğrudan büyütülür. MFSFET yapılarda silisyum ve ferroelektrik ince film arayüzeyinde, silisyum tabanlı bileşiklerin oluşması, yüksek yoğunluklu tuzak türlerin varlığı, silisyum yarıiletkeni üzerine elementlerin difüzyonu gibi problemlerle karşılaşmaktadır. Bu problemleri çözmek için bir tampon (buffer) tabaka silikon altlığı ile ferroelektrik ince film arasına yerleştirilerek MFIS yapılar oluşturulmuştur (Chou ve ark., 2009). Tipik bir tampon tabaka yüksek dielektrik sabitli iyi arayüzey özellikleri ve düşük kaçak akım yoğunluğu gibi özelliklere sahip olmalıdır.

Ferroelektrik cihazlarda genellikle en çok kullanılan alttaş yapılardan biri Pt/TiO₂/SiO₂/Si' dir (Calzada ve ark., 2001). Silikon üzerine termal oksidasyon yoluyla belirli sıcaklıklarda ortamdan belirli hızlarda kuru O₂ geçirilerek SiO₂ büyütülür. Bu çok ince arayüzey yalıtkan tabaka ferroelektrik film ve silikon yarıiletkeni arasındaki iç difüzyonu önler ve aynı zamanda elektrik alanın azalmasını engeller. Fakat SiO₂ oksit tabaka çok ince olursa bu durumda kaçak akım ince oksit tabaka boyunca akan elektronların doğrudan tünellemesi üzerine dayanır. Bu yüzden silikon altlığı ve ferroelektrik ince film arasına yüksek dielektrik sabitli bir yalıtkan yerleştirilir (Lim ve Kalkur, 1997). Pt (platin) yüksek sıcaklıklarda bile kimyasal hareketsizliğe sahiptir. Ancak Pt ve SiO₂ arasındaki zayıf yapışma nedeniyle yapışma tabakası olarak bir tampon tabaka vazifesi gören TiO₂' nin kullanılmasını gerektirir. Entegre edilmiş ferroelektrik ince filmlerde alt ve üst elektrotlar harici bir elektriksel alanın uygulanmasıyla iki kutuplanma durumları arasında bellek aygıtları anahtarlama için gereklidir.

Kendiliğinden kutuplanmaya sahip olan ferroelektrik kristaller genellikle akıllı kart teknolojisinde uçucu olmayan ferroelektrik rastgele erişim belleklerinde kullanılmaktadır. Bilgisayar ve iletişim teknolojisinde kullanılan dinamik rastgele erişim belleği (DRAM), flaş bellek ve ferroelektrik rastgele erişim belleği (FeRAM) gibi bellekler elektronik endüstrisi için önemli ve vazgeçilmez cihazlardır. Son yıllarda teknolojik büyümenin olağan üstü hızı veri (data) toplama cihazları gibi ilgili donanıma ilaveten, bilgisayar donanım ve yazılımında da önemli gelişmelere yol açmıştır (Bechhoefer, 2007).

Dinamik rastgele erişim belleği (DRAM) bütün kişisel bilgisayarlar için bellek (memory) sağlayarak geçici veri depolamada en yaygın olarak kullanılan bellek türüdür. Geçici belleklerde elektrik akımı kesildiğinde ya da yenilenmediğinde bilgiler silinir. Her hafıza hücresinde 1 bitlik bilgi saklanır. Bu bit' lik veri hafıza hücresinde elektriksel bir yük olarak depolanmaktadır. DRAM' ın dielektrik kapasitöründe pozitif ve negatif yükler bir elektriksel alanın uygulanmasıyla kendi konumlarından yer değiştireceklerdir. Bu yer değiştirme veya kutuplanma elektriksel alan tekrar sıfır olduğunda yok olacaktır. FeRAM' larda kullanılan ferroelektrik malzemeler kendiliğinden kutuplanmaya sahiptir. Bu kutuplanma malzemenin kristal yapısına özgüdür. FeRAM' lar, ferroelektrik ince filmler DRAM' ların dielektrik tabakalarıyla yer değiştirildiğinde elde edilir (Setter, 2001).

FeRAM' lar diğer belleklerle karşılaştırıldığında yüksek hızda erişim, hızlı okuma sınırsız yazma, düşük çalışma voltajı, uçucu olmama ve geniş depolama kapasitesi gibi

avantajlar sağlamaktadır (Buhay, 1991). Kalıcı belleklerde bir defa kaydedilen ya da ortama gömülen bilgi bir daha değiştirilemez. Uçucu olmayan rastgele erişim belleklerinin temel prensibi metal-ferroelektrik-metal (MFM) kapasitörlerinin üzerine harici bir elektriksel alan uygulayarak kutuplanmanın tersine çevrilmesi üzerine dayanır. Okuma ve yazma işlemleri ferroelektrik kapasitörün anahtarlanması ile yapılır. FeRAM’ da okuma işlemi ferroelektrik filmin kutuplanmasına neden olan kapasitör elektrotları üzerinde ortaya çıkan yükler tarafından yapılırken, yazma işlemi bir ferroelektrik kapasitör üzerine pozitif veya negatif voltaj uygulayarak yapılır (Ishiwara, 2000). Her bir hafıza hücresi (bir bit depolayan), bir adet yarıiletken kondansatör ve transistordan meydana gelmiştir. Kondansatör bilgi depolar, transistor ise bilginin okunması ve değiştirilmesi için kullanılır. Kondansatör iki metal plaka arasına yalıtkan malzeme (ferroelektrik) konulmasıyla elde edilir.

İletim davranışı, kutuplanma yorgunluğu (fatigue) ve kapasitans gibi elektriksel özellikler cihazlarda depolanan belleğin (memory) ömrü için sınırlayıcı faktörler olmalarından dolayı cihaz işlevselliği açısından oldukça önemli parametrelerdir. FeRAM cihazlar için; büyük kalıcı kutuplanma, küçük zorlayıcı voltaj, düşük dielektrik sabiti ve uygun sıcaklık gibi kararlılık (stabilite) durumları uzun süreli dayanıklılık ve optimum performans için gereklidir. Bellek kutuplanma yönelimlerinden ziyade elektriksel yükler şeklinde depolanır. Yükleri süresiz olarak tutmak için, numune çok iyi yalıtkan olmalıdır. Diğer taraftan, dipollerin anahtarlanabilirliği ferroelektrik numune çok sayıda okuma/yazma (read/write) çevrimlerini (cycles) içinden geçirirken azalma gösterir (Duiker ve ark., 1990; Mihara ve ark., 1994).

3. 3. 1. Bizmut Tabaka Yapılı Ferroelektrikler

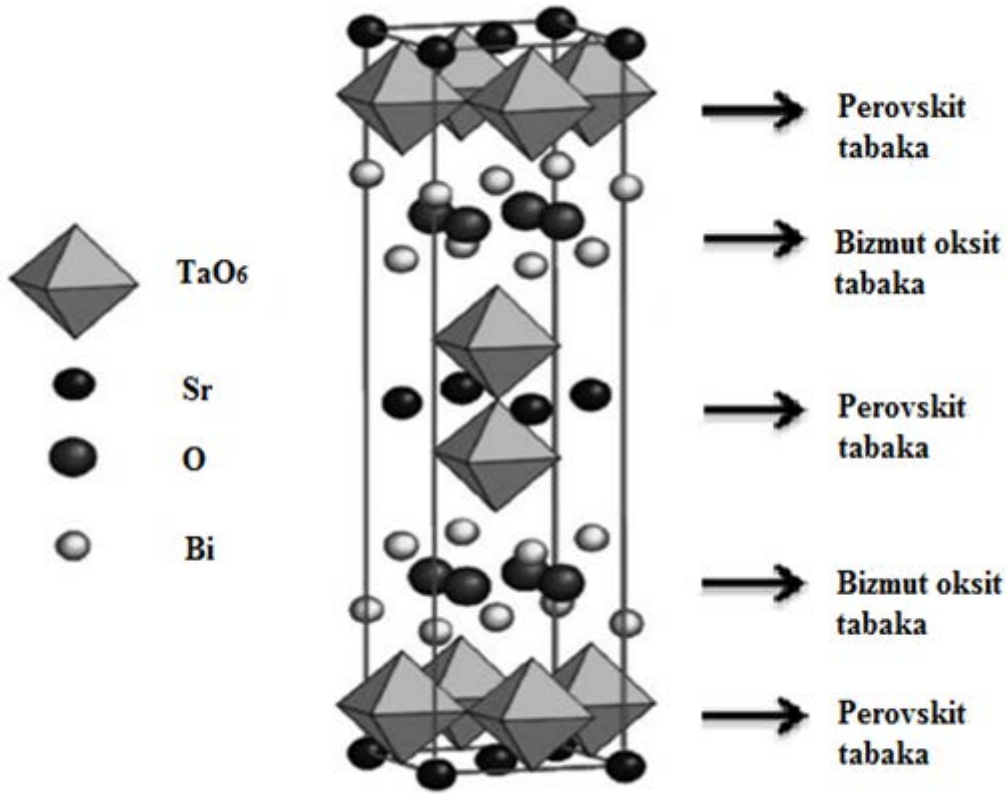
Bu çalışmada sol-jel (sol-gel) spin kaplama metoduyla üretilmiş olan SBT ince filmler kullanılmıştır. SBT ($\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$) ferroelektrik malzemeler bizmut tabaka yapılı perovskit oksitlerin sınıfına aittir. Bizmut tabaka yapılı ferroelektrikler ilk olarak 1949’ da Aurivillius tarafından keşfedilmiştir (Araujo, 1995). Stokimetric SBT ($\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$) ($m=2$) olarak tanımlanır. Stokimetric bileşikler kimyasal formüllerinde atom sayıları tam sayı ile ifade edilen bileşiklerdir.

Bizmut tabaka yapılı ferroelektrikler;



genel kimyasal formülü gösterimi ile Aurivillius fazlı olarak adlandırılan bileşiklerin çok katmanlı ailesine aittir. Burada A büyük boyutlu katyonları (Ca^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Bi^{3+} , Pb^{2+} vb.) ve B ise küçük boyutlu katyonları (Fe^{3+} , Ti^{4+} , Nb^{5+} , Ta^{5+} vb.) simgeler ve $m=2,3,4,\dots,8$ olup c-ekseni boyunca Bi_2O_2 tabakaları arasındaki BO_6 oktahedranın köşe paylaşım sayısını gösterir. BO_6 oktahedra kendiliğinden kutuplanma sergiler ve $(\text{Bi}_2\text{O}_2)^{2+}$ tabakalar paraelektrik yalıtkan tabakalar olarak davranırlar ve elektronik özellikleri kontrol ederler (Subbanna ve ark., 1990).

SBT'nin tabakalı yapısı psedü-tetragonal c-ekseni boyunca $(\text{Bi}_2\text{O}_2)^{2+}$ tabakalar arasında yerleştirilen $(\text{SrTa}_2\text{O}_7)^{2-}$ iki perovskit benzeri tabaka bloklarının istiflenmesiyle oluşturulur. c-ekseni boyunca O-Ta-O zincirlerinin aralıksız uzaması sadece Bi_2O_2 tabakalarının varlığını değil aynı zamanda c-eksenine dikey düzlemlerdeki perovskit benzeri hücrelerin dönüşümünü engeller. Yapıda Sr perovskit tabakalardaki küp-oktahedrali işgal eder (Şekil 3. 3. 1. 1).



Şekil 3. 3. 1. 1. Bizmut tabaka yapılı SBT (Gupta ve ark., 2010)

SBT gibi bizmut tabaka yapılı ferroelektrikler oda sıcaklığında ortorombik kristal yapısıyla ferroelektriktir ve paraelektrik fazda tetragonal yapıya sahiptirler. SBT bileşeni için örgü parametreleri ortorombik yapısı ile $a=0.5531$ nm, $b=0.5534$ nm ve $c=2.498$ nm olarak

bildirilmiştir (Rae ve ark., 1992). SBT’deki ferroelektriklik tetragonal paraelektrik fazdan oda sıcaklığındaki ferroelektrik faza geçişi nedeniyle oluşan yapısal bozulmadan kaynaklanır.

SBT ferroelektrik ince filmler ihmal edilebilir yorulma, düşük anahtarlanma voltajı ve düşük kaçak akım yoğunluğu gibi cazip özelliklerinden dolayı FeRAM uygulamaları için oldukça dikkat çekici avantajlara sahiptirler. Fakat SBT’ler düşük kalıcı kutuplanma, yüksek kristallenme sıcaklığı (>750 °C) ve düşük Curie sıcaklığı gibi dezavantajlara sahiptir. Bu yüksek işlem sıcaklıklarında elektrot arayüzey kümeleri şiddetli bir şekilde istikrarsızlık sergiler SBT ince film ve yüzey arasında etkileşimler meydana gelebilir (Calzada ve ark., 2001). Bu sıcaklıklar alttaş silikona zarar verir ve ayrıca Pt/TiO₂/SiO₂/Si gibi nispeten daha kararlı (stabil) alt tabaka yapılarda bile difüzyon (yayınım) olaylarını artırabilir. Bu istenmeyen reaksiyon nedeniyle SBT ince filmlerin mikroyapısal ve elektriksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu arayüzeyler ferroelektrik malzemelerin dielektrik ve ferroelektrik özelliklerini azaltabilir ve bu durumlar malzemelerin uçucu olmayan belleklerde kullanımını sınırlar. Bunun bir sonucu olarak arayüzey bölgeleri SBT filmler ile sıralı olarak oluşturulmaktadır. Bilimsel ve teknolojik çalışmaların büyük bir çoğunluğu çeşitli metal oksitlerle aşılıyarak, stokimetric olmayan fazda SBT üreterek ve iletken metal-oksit elektrotlar üzerinde SBT ince filmleri büyütürük bu önemli dezavantajların üstesinden gelmeyi amaçlamıştır (Noda ve ark., 1999; Hu ve ark., 2000).

Özellikle SBT ince filmlerin yapısı, morfolojisi ve elektriksel özellikleri kimyasal kompozisyonuyla yakından ilişkilidir. Faz oluşumu, ferroelektrik faz geçişleri, ferroelektrik özellikleri ve dielektrik özellikleri üzerinde Sr/Bi oranının etkileri araştırılmıştır. Stokimetric olmayan SBT fazdaki ince filmlerin stokimetric ince filmler ile karşılaştırıldığında daha yüksek kalıcı kutuplanma ve daha düşük zorlayıcı alana sahip olduğu gösterilmiştir. Bu bileşimlerde katyon (pozitif yüklü iyon) bozulur ve yapısal bozukluk Sr ve Bi konumlarının değişmesiyle meydana gelir. Bu gerçekte SBT’deki (Bi₂O₂)²⁺ tabakasının faz geçiş sıcaklığı (T_c), dielektrik sabiti, kaçak akım gibi elektriksel özellikleri değiştirmesi nedeniyledir. Bununla birlikte Sr miktarının az olduğu numune daha büyük kalıcı kutuplanmaya yol açan büyük atomik yer değiştirmeleri daha kolay yapar (Shimakawa, 1996). TaO₆ oktahedradaki O²⁻₍₅₎’nin ve Bi₂O₂ tabakasındaki Bi³⁺’nin büyük atomik yer değiştirmeleri SBT’deki büyük kendiliğinden kutuplanma değerleri için önemli bir rol oynar. TaO₆ oktahedradaki Ta⁵⁺ ve O²⁻ yer değiştirmelerinin toplam kutuplanmaya zıt bir şekilde katkı sağlamasına rağmen TaO₆’nin burkulmasından kaynaklanan net kutuplanma toplam ferroelektrik kutuplanmayı artırır (Shimakawa, 2002).

Chen ve arkadaşları MOD tekniği ile hazırlamış oldukları SBT ince filmlerin ferroelektrik özellikleri üzerinde fazladan bizmut miktarının etkilerini araştırmışlar ve %30-50 mol fazla bizmut miktarının zerre boyutu ve faz oluşumu açısından optimum bileşim olduğunu bulmuşlardır (Chen ve ark., 1997).

SBT ince filmlerde metalik bizmutun varlığı Scott tarafından saptanmıştır. Scott'a göre metalik bizmut SBT tabanlı aygıtların elektriksel özellikleri üzerine doğrudan bir etkiye sahip olan filmin arayüzey özelliklerini değiştirebilir. Ferroelektrik ince filmlerin elektriksel özellikleri kompozisyon ve mikroyapı değişiminden büyük ölçüde etkilenmektedir. Önceki literatür raporlarında bizmut tabakalı MFM yapıların elektriksel özellikleri üzerinde bizmut miktarının büyük bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Fazla bizmut miktarı tavlama boyunca alt elektrot içine bizmut difüzyonu ve termal işlem boyunca bizmutun yüksek uçuculuğu nedeniyle bizmutun kaybını önlemek için gereklidir. SBT' nin yüksek kristallenme sıcaklığı nedeniyle alt katman içine bizmutun ara difüzyonunu önlemek için düşük işlem sıcaklığında veya altkatman ve SBT arasında bir iletken arayüz oksit tabakayla büyütme gerekir (Shimakawa ve Kubo, 1999).

3. 4. Ferroelektrik İnce Film Üretim Teknikleri

Farklı amaçlara hizmet eden ince filmler modern yüksek teknolojinin birçok alanında temel bir basamaktır. İnce film kalınlığı nanometre boyutundan mikrometrelere kadar uzanan çeşitli katman malzemelere verilen isimdir. Optik kaplama, yüksek sıcaklık süperiletkenler, mikro ve nano elektronik uygulamalara kadar geniş bir teknolojik ve bilimsel araştırmalarda yer tutan ince filmler son zamanlarda en çok çalışılan güncel araştırma konulardan biridir. Günümüzde teknolojik gelişmelerin ve ticari uygulamaların temel ve belirleyici unsurlarından birini oluşturan ince film teknolojisi insanlığın kullandığı kişisel bilgisayar ve donanımlardan, haberleşme sistemlerine kadar birçok elektronik cihazın yapımında kullanılmaktadır.

Elektronik endüstrisinin hızlı gelişimi entegre edilen çeşitli elektronik cihazlarda yüksek performans, yüksek güvenilirlik ve minyatürize elektronik cihazlar gibi gereksinimleri meydana getirmiştir. İnce filmlerin boyutlarının diğer malzemelere oranla çok daha küçük ve ince olmasından dolayı elektronik devre tasarımlarında büyük kolaylıklar ve avantajlar sağlar. Günümüzdeki ince film malzemelere olan gereksinim yeni işlemlerin, malzemelerin ve teknolojinin gelişimine yol açmıştır. Teknolojik gelişmenin olağan üstü hızı ince filmlerin üretiminde birbirlerine alternatif olabilecek farklı avantajlara ve dezavantajlara

sahip olan yeni üretim tekniklerinin ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır (Pardo ve Ricote, 2011).

Mevcut çalışmalarda kullanılan ince film üretim teknikleri üç grupta sınıflandırılabilir.

- Fiziksel buhar depolama teknikleri (PVD); magnetron saçtırma ve atmalı lazer depolama gibi
- Kimyasal buhar depolama teknikleri (CVD); metal-organik kimyasal buhar depolama gibi
- Kimyasal çözelti depolama (CSD); sol-jel, Langmuir-Blodgett gibi

PVD ve CVD teknikleri kısmen var olan yatırım ve deneyimlerinden dolayı halen yarıiletken endüstrisi tarafından tercih edilmesine rağmen, CSD çok az bir sermaye gerektiren araç ve gereçler ile yararlı bir araştırma ve geliştirme metodudur. Bir CSD metodu kullanılarak ferroelektrik ince filmin üretilmesi dört temel basamak içerir.

Bunlar: (i) prekürsör çözeltinin sentezi, (ii) Bir alttaş üzerinde çözeltinin depolanması (iii) filmin kurutulması için düşük sıcaklıkta (200-400 °C) ısıtma işlemi (iiii) Kristallenme için yüksek sıcaklıklarda (600-1100 °C) amorf filmin tavlama işlemidir (Alkoy, 2006).

İnce filmler düşük sıcaklıklarda amorf yapı şeklinde depolanır. Bu yüzden düşük sıcaklıklarda hazırlanmış ince filmler belli zaman aralıklarında ve belirli bir sıcaklık aralığında kristalize edilmelidir (Hubert ve ark., 1996). İnce filmlerin sentezleme ve üretim tekniklerinin çoğunda en etkili işlem parametresi ısısız işlemin türü ve oranıdır. Geleneksel kristallendirme süreci düşük ısınma oranı ve uzun işlem süreci ile zerre büyümesine yol açar. Bu yüzden hızlı ısısız tavlama (RTA) daha kısa sürede daha yüksek ısıtma oranı ile mevcut çalışmalarda popüler bir şekilde kullanılmaktadır. Son zamanlarda mikrodalga tekniği geleneksel üretim teknikleri için bir alternatif teknik olarak ortaya çıkmıştır. Mikrodalga ile katılaştırma malzeme üretimindeki geleneksel katılaştırma tekniklerine göre geliştirilmiş mikroyapıya yol açan hızlı ve hacimsel ısınma, kontrollü zerre büyümesi, orantılı bir şekilde düşük işlem sıcaklığında daha yüksek yoğunluk gibi önemli avantajlara sahiptir (Sugandha ve Jha, 2013).

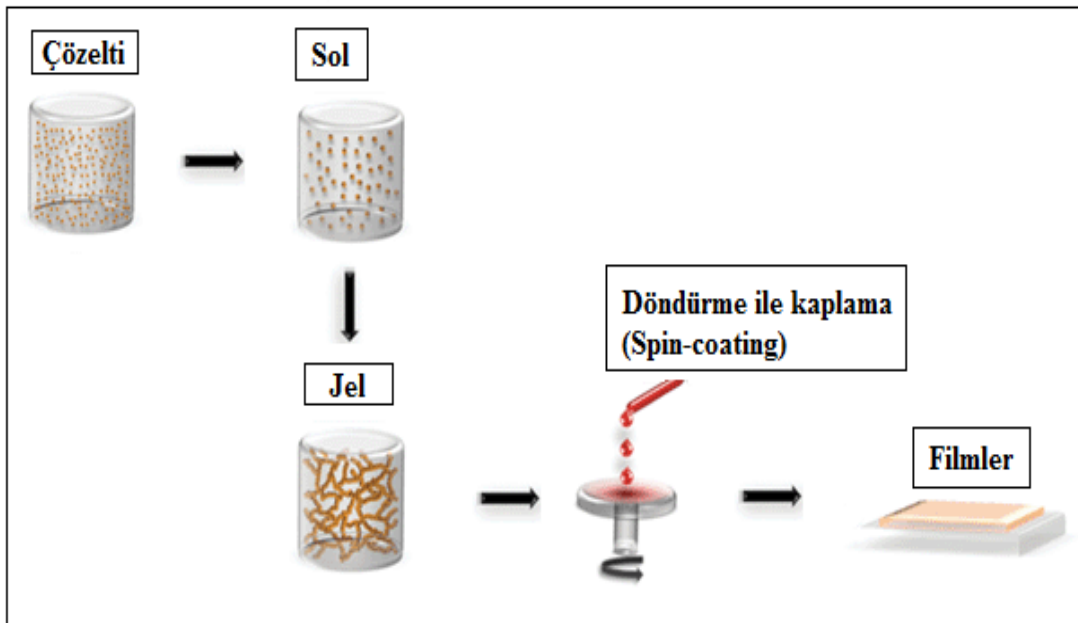
Ferroelektrik malzemelerin sentezleme ve üretim yöntemi bu malzemelerin mikroyapısal ve elektriksel özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynar. İnce filmlerin üretiminde önemli ilerlemeler ve gelişmeler sağlanmasına rağmen, üstteki tekniklerle ilgili olarak bazı problemler var olmaya devam etmektedir. Bunlar özellikle bizmut tabaka yapıli bileşikler için yüksek işlem sıcaklığı nedeniyle bizmut oksidin uçuculuğu, zerre boyutunda meydana gelen ani artış, başlayan oksitlenmenin tamamlanmamış reaksiyonundan

kaynaklanan homojen olmayan kompozisyonu içerir (Chen ve ark., 2008 ; Ramana ve ark., 2011).

Ferroelektrik ince film cihazların performansı filmlerin kompozisyonuna bağlı olduğu kadar safsızlıklara, yapısal kusurlara, tasarımına, üretim koşullarına, ince film-elektrot ve ince film-tampon dielektrik arayüzlerinin mikroyapısına bağlıdır. Gerçekte önerilen aygıt geometrilerinin birçoğu yüksek kalitede ince filmlerin büyümesini gerektirir. Fakat kinetik etkiler ve depolama koşulları büyümeye başlayan yüzeyde malzemeye bağlı olarak filmlerde kusurların (dislokasyonlar, safsızlıklar gibi) oluşumuna ve pürüzlülüğe neden olabilir. Yüzeylerin ve arayüzeylerin pürüzlü morfolojisi, malzeme kusurlarının varlığı ve ince filmin mikroyapısının mikroelektronik cihazların çalışma koşullarını etkilediği bilinmektedir (Zhao ve ark., 1999). İnce filmler beklenen çalışma fonksiyonları gösterebilmeleri için uygun kalınlık, kimyasal bileşim ve karakteristik özelliklere sahip olmalıdırlar. Kristal yapı, mikroyapı, yüzey morfolojisi, kompozisyon bütünlüğü, film/altkatman ve film/elektrot arayüzlerinin ince filmin kalitesi ve güvenilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Cole ve ark., 2000).

3. 4. 1. Sol-Jel Yöntemi

Sol-jel yöntemi ince film yapımında oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Genel olarak sol-jel sürecinde sistem sıvı fazdan (sol) katı faza (jel) geçiş yapar (Şekil 3. 4. 1. 1). “Sol” için başlangıç malzemeleri inorganik metal tuzları ya da metal inorganik bileşenlerdir.



Şekil 3. 4. 1. 1. Sol-Jel yöntemiyle ince film üretim aşamaları (Sanchez, 2011)

Sol-jel sürecinde ana malzeme çözücü içinde çözünüp bir seri hidroliz ve polimerizasyon tepkimeleri ile koloidal bir yapı olan “sol” e dönüşür.

Koloidal olarak tanımlanan tanecikler ise 500 nm ve daha altındaki boyutlara sahip taneciklerdir. Koloidal yapılar heterojen ile homojen yapılar arasındadır. Çözülen tanecikler çok küçük tanecikler olmasa da çökme meydana gelmez çözücünden ayrılmazlar. “Sol” bu alt tabaka üzerine kaplandığında ıslak jel (xerojel) haline dönüşecektir. Moleküller arası Van Der Waals ve elektriksel itme kuvvetlerinin etkisi yerçekimi kuvvetine göre daha fazla olduğu için sol meydana getiren malzemeler dibe çökmez. İşte bu molekül çözelti içinde genişleyerek büyük bir boyuta ulaşırsa bu maddeye jel denir. Jel, katı ve sıvı fazı arasında bir ara fazdır. Bu tekniklerin herhangi biri ile elde edilen amorf film genellikle belli bir sıcaklıkta tavlanarak kristalleşir ve yoğunlaştırılır.

Sol-jel yönteminin uygun homojenlik, stokimetrisinin kolay kontrolü, geniş depolama alanı ve kompleks oksit filmlerin kolay üretimi gibi birçok avantajı vardır (Guo ve ark., 2007). En büyük avantajı ise kaplanan filmin mikroyapısının kolayca kontrol edilebilir olmasıdır. Ancak bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan bazıları nem, ışık ve sıcaklık gibi çevresel koşullara aşırı derecede duyarlı olmasıdır. Sol-jel işleminde jelleşme öncesi akışkan sol veya çözelti herhangi bir yüzey üzerine yaygın olarak kullanılan daldırma, püskürtme ve döndürme teknikleriyle kaplanabilir. Sert bir tabaka veya az eğimli altaşlar üzerine ince film üretmek için kullanılan bir işlemdir.

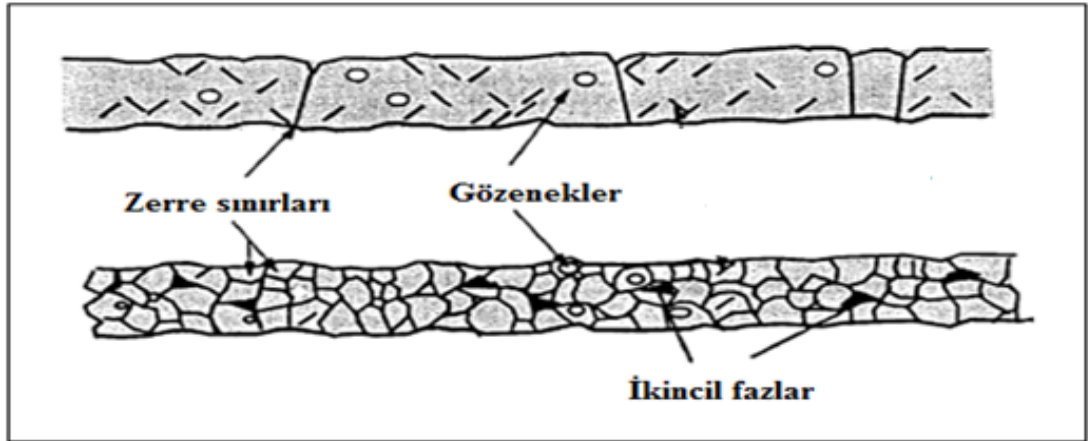
Döndürme işlemi ile film kaplama dört safhaya ayrılabilir. Bu safhalar: kaplama, döndürme, döndürmeyi sonlandırma ve buharlaştırmadır. Kaplama safhasında, yüzey üzerine bir miktar sıvı dökülür. İkinci safha olan döndürmede ise sıvı merkezci kuvvet nedeni ile radyal bir şekilde taşıyıcı yüzeyin dışına doğru akar. Döndürme sonunda fazla olan sıvı taşıyıcı yüzeyinden taşarak yüzeyi terk eder. Film kalınlığının azalması ile yüzeyden taşan sıvının miktarı azalır. Buharlaştırma safhası filmlerin incelmesindeki son safhadır. Döndürerek kaplamanın bir avantajı film oluşurken yüzeyde oluşmaya başlayan filmin düzgün bir şekilde dağılmasıdır. Bunun sonucu olarak film kalınlığı, yüzey boyunca homojen bir özellik gösterir (Jeffrey, 1990).

4. METOD

Silikon teknolojisinde SBT ince filmlerin başarılı bir şekilde entegrasyonu için bu malzemelerin elektriksel özelliklerini ayrıntılı bir şekilde araştırmak gereklidir. Polikristal ferroelektriklerde mikroyapı ince filmin elektriksel performansını belirlemede etken bir faktördür. Kullanılan ısısal işlemlerin türü ve oranı, malzeme üretim teknikleri, kimyasal bileşimdeki farklılıklar vb. değişkenlerin, zerre büyümesi ve yüzey morfolojisi gibi mikroyapısal özellikleri etkilediği bilinmektedir. Bu yüzden cihazın çalışma performansı açısından mikroyapıyı oluşturan zerrelerin boyutu, biçimi, dağılımı, gözeneklik, yüzey morfolojisi ve olası ikincil fazların varlığı gibi özellikleri karakterize etmek önemlidir.

4. 1. Ferroelektrik İnce Filmlerde Mikroyapı ve Analiz Yöntemleri

Mikroyapı tanım olarak zerrelerin boyutunu, biçimini, morfolojisini, boyut dağılımını, zerreler arası sınırları, yüzey morfolojilerini, gözenek yoğunluğunu, ikincil veya amorf fazları ifade eder (Şekil 4. 1. 1). Her bir kristal parçacığı zerre olarak adlandırılır ve kristallerin karşılaştığı bölgeye zerre sınırı adı verilir. Elektroseramik ince filmlerin mikroyapıları depolama tekniğine, depolanan malzemeye, film/elektrot arayüzüne ve depolama parametrelerine bağlı olarak farklılıklar sergilemektedir (Waser, 1995).



Şekil 4. 1. 1. Ufak zerrelili polikristal filmin mikroyapı gösterimi (Waser, 1995)

İnce filmler düşük sıcaklıklarda amorf yapı şeklinde oluşur. Bu yüzden düşük sıcaklıklarda hazırlanmış ince filmler belli zaman aralıklarında ve belirli bir sıcaklık aralığında kristalize edilmelidir (Hubert ve ark., 1996). Kristallendirme süreçlerinin alttabaka,

ısısal tavlama, atmosfer ve kurutma koşulları gibi değişkenler tarafından etkilendiği bildirilmiştir (Park, 1999).

İnce filmlerin kristallenmesi için kullanılan ısısal işlemlerin türü ve oranları mikroyapı üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Zerre boyutu ve şekli, yüzey pürüzlülüğü, dielektrik sabiti, kalıcı kutuplanma ve zorlayıcı elektriksel alan gibi elektriksel ve fiziksel özellikler tavlama sürecinden büyük bir oranda etkilenmektedir (Li ve ark., 2002). Eğer ince filmler yüksek bir işlem sıcaklığına maruz bırakılırsa film pürüzlülüğünde ve gözenek gibi kusurların varlığında genellikle bir artış gözlenmektedir.

Katılaştırma süreci hem yoğunlaşmayı hem de zerrelerin büyümesini kapsar. Yoğun maddelerdeki zerre büyümesi zerre sınırı hareketi ile ilişkilidir. Normalde tavlama süresindeki artışa göre zerre büyümesi iki bölgede var olur. Birinci bölgede zerreler çekirdeklenme oluşumundan sonra doğrusal bir şekilde büyür ve ikinci bölgede zerreler zerre sıkışmasıyla hızlı bir şekilde büyür. Genellikle ufak zerre boyutu ve yoğun bir yüzey beklenir. Bundan dolayı tavlama süresinin kontrolü filmin farklı zerre boyutlarını elde etmek için önemlidir (Yang ve ark., 2001).

Kristal katılar tek kristal ve polikristal olarak iki ayrı kategoriye ayrılabilirler. Tek kristal katıda düzenli atomik sıralanmış tüm kristal boyunca görülür. Ancak polikristal bir katıda bu düzgün sıralanış birkaç angstromdan birkaç cm ye kadar olan zerre boyutuna sahip kristal bölgeleri kadardır. Bir polikristal katı zerre sınırları (farklı geometrik bölgelerin birbirlerinden ayrıldıkları sınır bölgeleri) ile çevrili çok sayıda küçük tek kristal bölgeleri içerir. Zerre sınırları ve yüzeyler periyodik kristal örgünün kopmasından kaynaklanır ve bozulmadan dolayı kopuk bağ ve yanlış yerleşmiş atomlar gibi elektronik durumlar ortaya çıkar (Waser, 1995). Çok ufak zerre boyutlu polikristal ferroelektrik ince filmlerde zerre sınırları önemli kristal kusurdur. Polikristal filmlerde zerre sınırları ya taşıyıcıları (elektronlar ve holler) yakalayarak ya da taşıyıcıların saçılmasını sağlayarak yük taşınımını etkiler. Her bir zerre içerisinde küçük bir kristale benzer olarak atomlar düzenli bir şekilde dizilmiştir, fakat her bir zerrede atomik düzlemlerin yönelimleri komşu parçadan farklıdır. Zerre sınırlarında (diğer zerreinin başladığı nokta) kristal yapı kesintiye uğrar ve atomların düzenli yapısı tahrip olur. Dolayısıyla malzemelerde atomların dizilişleri bazı bölgelerde düzenli iken bazı bölgelerde düzensizdir. Zerre sınırları ile ilişkilendirilen temelde iki düzensizlik vardır; yapısal ve kimyasal düzensizlikler. Yapısal düzensizlik sınırlardaki örgü uyumsuzluğundan kaynaklanır. Küçük açılı ve büyük açılı olarak adlandırılan zerre sınırları var olduğunda zerre

sınırları biçimsiz veya amorf benzeri olarak kabul edilir (Moller, 1991). Kimyasal düzensizlik aslında yapısal düzensizliğin bir sonucu olan zerre sınırları ve zerrelerin içi arasındaki bileşimsel farklılıklarla ilgilidir. Yapılan çalışmalarda ferroelektrik ince filmlerin zerre boyutları ve sınırları ile doyum polarizasyonu, kalıcı kutuplanma ve kaçak akım gibi ferroelektrik özellikler arasında yakın bir ilişki olduğu tespit edilmiştir (Ahn ve ark., 2004).

Yapısal düzensizlik zerre sınırlarını enerjik olarak aktif hale getirir. Şöyle ki özden ve dışsal kusurlar genellikle ya dislokasyonların (çıkıklar) köşelerinde, zerre sınırlarında, domain sınırlarında ya da elektrot/ferroelektrik arayüzeyinde tutunurlar. Çünkü bu sınırlar ara yüzeyler, kusurlar ve safsızlıklar için düşük potansiyel enerji bölgeleri sağlayabilir. Zerre sınırlarının öz direnci işlem koşulları ile değişir ve düşük sıcaklıkta depolanan filmlerde zerre sınırları genellikle yük taşıyıcıları için potansiyel engelleri olarak teşkil etmezler. Tutulan kusurlar ya domain sabitlenmesine ya da polarizasyon yorulmasına ve yüksek kaçak akıma neden olan elektrot/ferroelektrik arayüzeyinde yapısal bir değişikliğe neden olabilir (Zhu ve ark., 2001). Bu yüzden zerre sınırlarının serbest yük taşıyıcıları, özden kristal kusurları ve safsızlıklar ile etkileşmeleri nedeniyle ferroelektrik ince film malzemelerin elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynar. Bu mikroyapısal etki faktörlerinin açıklanması, ferroelektrik malzemeler üzerine dayanan elektronik cihazların eşdeğer devrelerinin doğru tasarımı ve bunun yanı sıra ferroelektrik kapasitörler üzerinde yapılan elektriksel ölçümlerin sonuçlarından malzeme özelliklerinin doğru yorumlama ve çıkarımı için önemlidir.

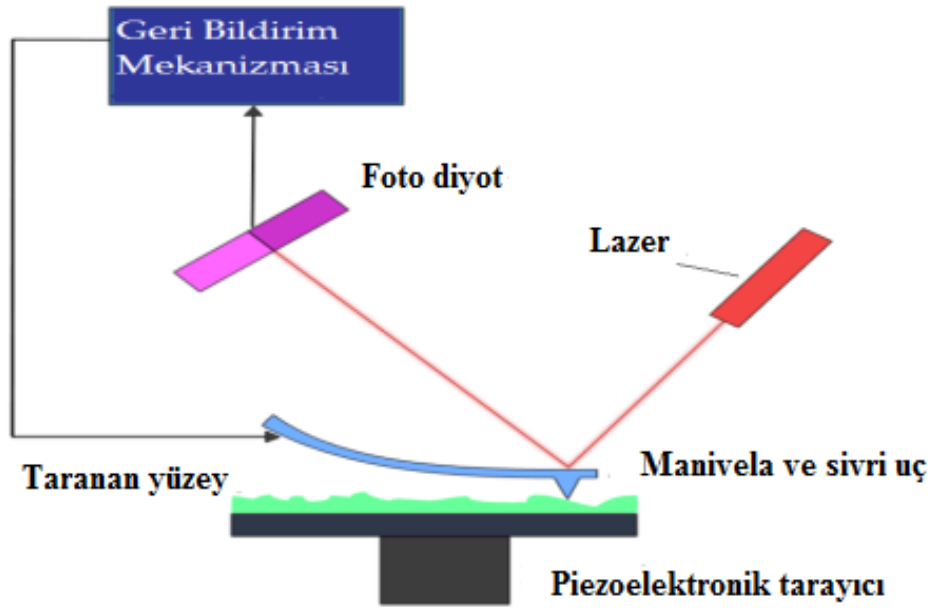
Mikroyapı kontrolü ferroelektrik ince film malzemelerin performansını optimize etmede önemli bir konudur. Elektronik aygıt ve cihazların güvenilir çalışması için ince filmin özgün yapısı, mikroyapısı, arayüzeyi ve yüzey morfolojilerinin en uygun şartlarda oluşum şartları karşılanmalıdır ve bu gereksinimleri karşılamak için numunenin mikroyapısal ve yüzey morfoloji özellikleri karakterize edilmelidir. Mikroyapının tespit edilmesi üretim koşulları ve ince filmlerin özelliklerini ilişkilendirmek için önemlidir. Bu ayrıca çeşitli teknolojik uygulamalarda gerekli olan malzemelerin özelliklerini değiştirmede ve iyileştirmede yardımcı olur (Kumar, 2012).

Mikroyapı analizi SEM (taramalı elektron mikroskobu) ve AFM (atomik kuvvet mikroskobu) gibi ölçüm teknikleriyle değerlendirilir. İnce filmlerin yüzey morfolojisi cihazların çalışma işlevselliği açısından önemli olan kaçak akım, bozunma voltajı, ferroelektrik özellikler ve entegrasyon süreci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüzey

morfolojisi incelenen numunedeki zerrelere boyutu, şekli, dağılımı, gözenekliliğin dağılımı ve ayrıca numunedeki olası farklı ikincil fazların varlığı hakkında bilgi verir.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronların numune yüzeyine çarptırılıp yansıtılması prensibiyle çalışmaktadır. Çeşitli alanlarda üretilen malzemelerin SEM taramalı elektron mikroskobu, incelenen numunenin 10.000 kat kadar büyütülmüş görüntüsünü ve ileri teknoloji malzemelerinin yüzey görüntüsünü alabilmektedir. Bu sayede incelenen numune veya çeşitli malzemeler üzerindeki makro ve mikro yapıları rahatlıkla değerlendirebiliriz.

Atomik kuvvet mikroskobu hassas bir iğnenin yüzeyi taramasıyla, yüzeyin iki veya üç boyutlu olarak mikrometre ve nanometre aralığında topoğrafik görüntülenmesini sağlayan bir yöntemdir (Şekil 4. 1. 2).



Şekil 4. 1. 2. Atomik kuvvet mikroskobu çalışma prensibi (www. Wikipedia. com)

Yapısal karakterizasyonun temel amacı atomların bir katı içerisinde üç boyutlu yerleşimlerinin tanımlanmasıdır. Katıların fiziksel özellikleri (elektriksel ve ferroelektriksel özellikleri gibi) malzemelerin atomik düzenlenmelerine bağlı olduğu için kristal yapının belirlenmesi malzemelerin yapısal karakterizasyonunun önemli bir parçasıdır. Atomların dizilme şekillerine bağlı olarak malzemelerin özellikleri ve mikroyapıları değişmektedir. Atomların üç boyutlu olarak belirli bir geometrik düzene göre dizilmeleri sonucu meydana

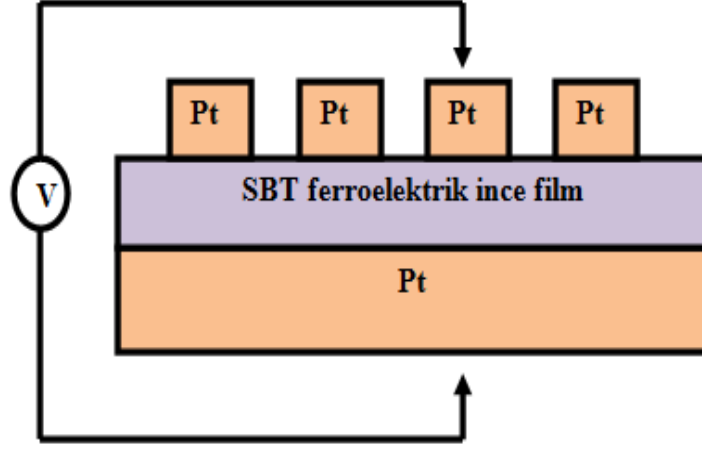
gelen yapıya kristal yapı veya kristal örgü denir. Kristal yapının tekrarlanan en küçük hacimsel birimine birim hücre adı verilir. Kristal örgü birim hücrelerin yan yana gelmeleriyle meydana gelir.

Yapısal analizi belirlemede kullanılan en etkili yöntemlerden biri X-ışınımı kırınım (X-Ray diffraction) metodudur. X-ışını kırınım cihazıyla kristal malzemelerin, ince filmlerin ve polimerlerin kristal yapıları tayin edilebilir. XRD kristal fazlarının karakterizasyonu için zararlı olmayan bir araştırma metodudur. XRD spektrumundan kristal morfolojisinin yapısal özellikleri, kristal düzlemlerinin kristallenme ve yönelimlerinin derecesi, kristal içerisinde bulunabilecek katkı atomları gibi pek çok özellik incelenebilmektedir. Kırınım desenlerine, piklerin genişliklerine ve konumuna bakılarak numunenin kristallenmesi hakkında bilgi edinilir (Kittel, 1996).

4. 2. Ferroelektrik İnce Filmlerde Elektriksel Karakterizasyon Yöntem ve Teknikleri

Entegre devre üretimi öncesi ferroelektrik malzemelerin elektriksel özelliklerini anlama cihaz özelliğine bağlı etken malzeme özelliklerini değiştirmek ve iyileştirmek için gereklidir. Bellek aygıtlar gibi mikroelektronik uygulamalarda kullanılan ferroelektrik ince filmlerin elektriksel karakterizasyonu genellikle akım-gerilim (I-V), kapasitans-gerilim (C-V) ve polarizasyon-gerilim (P-V) gibi ölçümlerle karakterize edilir. Kapsamlı bir I-V çalışması diğer elektriksel ve ferroelektrik ölçümler olan C-V ve P-V ile birlikte değerlendirildiğinde yük taşıyıcılarının hareketinin ve onların örgü kusurları, safsızlıklar, zerre sınırları ve elektrot arayüzeyleri gibi diğer etkiler ile birleştirilmesiyle bunların mikroskobik bir görünümünü anlatır (Hu ve Krupanidhi, 1994).

Bir ferroelektrik kapasitör ferroelektrik numune üzerindeki elektriksel ölçümleri gerçekleştirmek için mümkün olan en basit aygıttır. Bir ferroelektrik kapasitör iki metal elektrot arasına bir ferroelektrik malzemenin yerleştirilmesiyle oluşturulur (Şekil 4. 2. 1). Pt, Ir, Al vb. metallerle elektrotlanarak elektriksel karakterizasyon yapılır.



Şekil 4. 2. 1. Metal-ferroelektrik-metal (MFM) yapı ve ölçümü

Histerise eğrisi ferroelektrik malzemelerin elektrik anahtarlanma davranışını gösteren bir dögüdür. Bellek uygulamaları için en önemli malzeme parametreleri kalıcı polarizasyon (P_r), doyum polarizasyonu (P_s) ve zorlayıcı voltaj (V_c) veya zorlayıcı elektriksel alandır (E_c). Bu önemli parametreleri ferroelektrik kapasitörün histerise dögüsünden (P-V) gözlemleyebiliriz (Şekil 3. 2. 3). Histerise dögüsü ferroelektrik malzemelerin hafıza aralığı hakkında bilgi verir. Bellek aralığı mobil iyonlar, zorlayıcı alan ve kutuplanmanın doyum seviyesi gibi niceliklerle ilişkilidir ve ferroelektrik ince filmlerin zerre boyutu, film kalınlığı, kullanılan ısıl işlemlerin türü ve üretim tekniği gibi etkenler tarafından etkilenir (Yoshimura ve Fujimura, 2000). Ferroelektrik histerise eğrileri bir AC gerilimi kullanılarak bir Sawyer-Tower devresi vasıtasıyla deneysel bir şekilde ölçülebilir ve bir osiloskop ekranında gözlenebilir (Xu, 1991).

Dielektrik sabitine karşı elektriksel alan dögüsü (ϵ -E veya C-E) ferroelektrik malzemelerin elektriksel karakterizasyonunu belirlemede sıklıkla kullanılan bir elektriksel ölçüm tekniğidir. Malzemeye dışarıdan bir elektriksel alan uygulandığında, enerjiyi depolama kabiliyetine sahip ise bu malzeme dielektriktir. Dielektrik sabiti dış bir elektiksel alan altında ne kadar enerji depolandığını ve malzeme içerisinde kaybolan enerji miktarını belirlemek için kullanılır. Dielektrik sabiti bir maddenin doğal özelliğidir ve maddeden maddeye göre değişir.

Kapasitans uygulanan bir DC (doğru akım) giriş voltajı üzerine küçük bir AC (alternatif akım) voltajının bindirilmesi ile ölçülür (Damjanovic, 1998). Kapasitör (elektrik kondansatörü) bir dielektrik ile ayrılan (ferroelektrik malzeme) iki paralel metal plaka veya

elektrotlardan oluşur (Şekil 4. 3). Plakalar arasındaki potansiyel farkın büyüklüğü ile yükün büyüklüğü arasındaki oran kapasitans olarak tanımlanır. Kapasitans yük depolayabilen kondansatörün bir ölçüsüdür. Plakalar arasına bir yalıtkan veya dielektrik malzemenin yerleştirilmesi plakalardaki yükü değiştirmeden kapasiteyi artırır. Dielektrik, plakalar arasındaki boşluğu tamamen doldurursa, kondansatörün kapasitansı boyutsuz ϵ_r çarpanı kadar artar. Ayrıca dielektrik malzeme, kapasitörün maksimum çalışma voltajını artırır. Bundan dolayı kapasitedeki bir artış plakalar arasındaki potansiyel farkın düşmesine karşılık gelmelidir. Çünkü dielektrik maddenin kutuplanması sonucunda oluşan kutuplanma alanı, uygulanan dış alana zıt yönde olduğu için dış alanı zayıflatacaktır.

Paralel plakalı kondansatörün kapasitansı;

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (4.1)$$

şeklindedir. Kondansatör bir dielektrikle doldurulduğunda;

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (4.2)$$

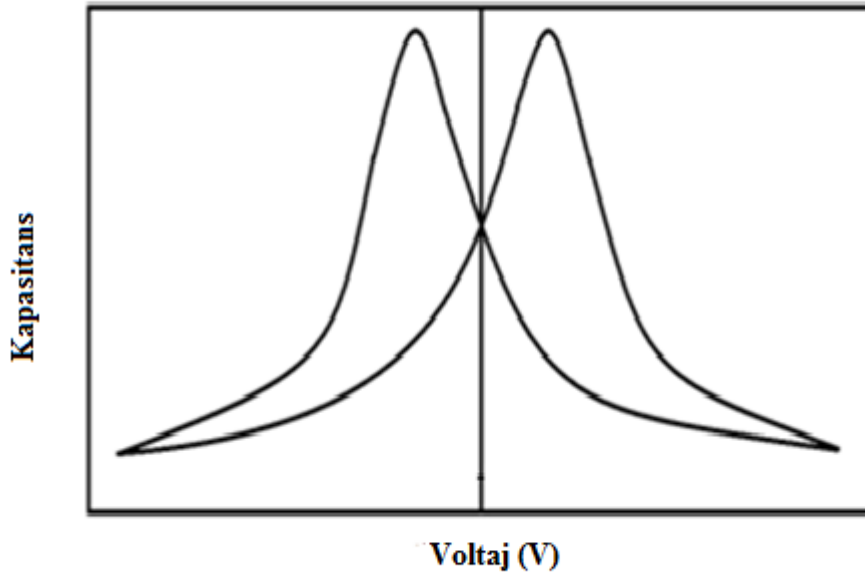
Burada ; ΔQ ; tek bir plakada depolanan yük, ΔV ; iki potansiyel arasındaki fark, ϵ_r ; dielektrik sabiti, ϵ_0 ; vakumun elektriksel geçirgenliği (permittivity), A ; plaka alanı, d ; plakalar arasındaki mesafe veya dielektrik kalınlıktır.

Denklemden görüldüğü gibi kapasitans iletken plakaların alanı ile doğru orantılı ve aralarındaki mesafe ile ters orantılıdır. Ayrıca plakaları ayıran malzemenin dielektrik sabitiyle doğru orantılıdır. Paralel plakalı bir kapasitör için kapasite dielektrik ince filmin kalınlığına $C \sim 1/d$ şeklinde bağlıdır. d 'nin küçük olması depolayacağı elektrik yükü miktarını artırır.

Yüksek dielektrik sabiti kapasitörün hacimsel verimliliğini artırmada ve elektrik/elektronik aygıtların boyutlarını küçültmede kullanılabilen çok katmanlı seramik kapasitörleri hazırlamada oldukça yararlıdır (Goodman, 1986). Dielektrik malzemelerin yalıtkanlık özelliklerini koruyabildikleri uygulanabilen bir maksimum elektriksel alan vardır. Bu malzemenin dielektrik sertliği (strength) olarak bilinir. Bu nokta aşıldığında dielektrik malzeme bozulmaya başlar ve akımı çok kolay iletir. Bozunma voltajı bir kapasitör için çalışma voltajının üst sınırını gösterir. Bozunma voltajı aşıldığında kapasitörde kalıcı hasarlara yol açar. FeRAM tipli kapasitör üretmek için dielektrik sabitinin düşük olması tercih

edilir, çünkü yüksek dielektrik sabitli bir malzeme büyük bir yer değiştirme akımı meydana getirir ve bu durum anahtarlanma akımının belirlenmesini engeller (Ishiwara, 2000).

Ferroelektrik numuneler kapasitans-gerilim (C-V) ilişkilerinde kelebek eğrisi (butterfly loop) karakteristiği sergilerler çünkü kapasitans artan ve azalan voltaj için farklıdır (Şekil 4. 2. 2). Ferroelektriklerin kapasitans-gerilim eğrisi elektriksel ölçümler ve mikroyapı verileriyle ilişkilidir.



Şekil 4. 2. 2. Kapasitans-gerilim (C-V) eğrisi

Maksimum kapasitans kendiliğinden kutuplanma anahtarlanması etrafında gözlenebilir. Bu dielektrik ve elektrot arasındaki arayüzeyde yük birikimi veya hareketli iyonların düşük bir konsantrasyonun var olduğunu gösterir.

Dielektrik filmdeki küçük gözenekler (pinholes) gibi kusurlar ve metal/dielektrik ara yüzeyinde meydana gelen pürüzlülükler yalıtkan malzemenin dielektrik sabitini etkileyen kapasitör alanı içinde elektrik alan özelliklerini değiştirebilir (Zhao ve ark., 1999). İnce yalıtkan bir filmin dielektrik sabitini belirlemek için kapasitans ölçümleri önemli bir konudur. Dielektrik sabiti ve dağılımının tavlama sıcaklığı, elektrotların türü, kusurlar, domain duvarları, zerre boyutu ve faz bileşimleri gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğu bilinmektedir (Simões ve ark., 2007).

Polikristal ferroelektrik malzemelerin özellikleri üzerinde mikroyapı etkisinin bilinen en iyi örneği BaTiO₃ (Baryum Titanat) ince filmlerde dielektrik sabitinin zerre boyutuna bağlılığıdır. Arlt ve ark. dielektrik sabitinin zerre boyutuna bağlılığını 0,7 µm' den daha az zerre boyutlu BaTiO₃ numuneler için daha belirgin olduğuna dikkat çekmişlerdir. Teorik hesaplama yoluyla 90°' li domain duvarları yoğunluğunun zerre boyutunun karekökü ile ters orantılı olduğunun hesapladılar. Böylece birim hacim başına dielektrik sabitinin azalmasına katkı sağlayan 90°' li domain duvarlarının alanın zerre boyutunun azalmasıyla arttığını ve ayrıca domain duvarlarının sabitlenme etkisinin kutuplanmanın azalmasına katkı sağladığını buldular (Arlt ve ark., 1985). Ayrıca domain duvarının sabitlenme etkisi kutuplanmanın azalmasına katkı sağlar. Ufak zerrelili ince filmlerde daha çok sabitlenme etkisi meydana geldiğinden dolayı ince filmlerde domain duvarında daha çok sabitlenme etkisi meydana gelecektir. Domain duvarı hareketliliğinden dolayı anahtarlanma hızı azalacaktır ve böylece dielektrik sabitini düşürecektir.

Ferroelektrik ince filmlerin akım-gerilim (I-V) karakteristiğine bakılarak kaçak akım analizi yapılabilir. Kaçak akımın büyüklüğü genellikle ince filmlerin uygulamaları için en önemli konulardan biridir. Kaçak akım analizi bir dielektrik ince filmin kalitesini belirleyen bir elektriksel ölçümdür. Dielektrik doğasından dolayı ferroelektrik malzemeler yalıtkan olduklarından dolayı çok yüksek elektriksel dirence sahip olmaları beklenir. Ancak anyonik/kasyonik boşluklar, yapısal çarpıklıklar, zerre sınırları, film/elektrot ve ferroelektrik film-yalıtkan tabaka arayüzeyleri gibi çeşitli faktörler kaçak akım vasıtasıyla yüklerin hareketine katkı sağlamasıyla düşük direnç kanalları ve mekanizmaları olarak davranırlar (Shelke ve ark., 2009). Ferroelektrik ince filmlerin kaçak akımına büyük katkıyı safsızlık fazları, gözenekler, kusurlar, yüzey pürüzlülüğü ve kimyasal kompozisyon farklılıkları gibi değişik faktörler sağlar (Lee, 2005). MFM yapıya uygulanan bir gerilim arayüzey bölgelerindeki bant bükülmelerini değiştirerek ve elektrotlardan yük taşıyıcılarını (elektronlar ve holler) enjekte ederek dengenin bozulmasına yol açacaktır. Enjekte edilen taşıyıcıların bir miktarı arayüzey bölgelerinde tuzaklanır. Boşluklar, mobil iyonlar, zerre sınırları ve film/elektrot arayüzeyi tuzakları gibi yapısal kusurlar nedeniyle, yük taşıyıcılarının (elektronlar ve holler) yüksek yoğunluğu var olabilir ve harici bir gerilim altında ince film boyunca akabilir (Wang, 2001).

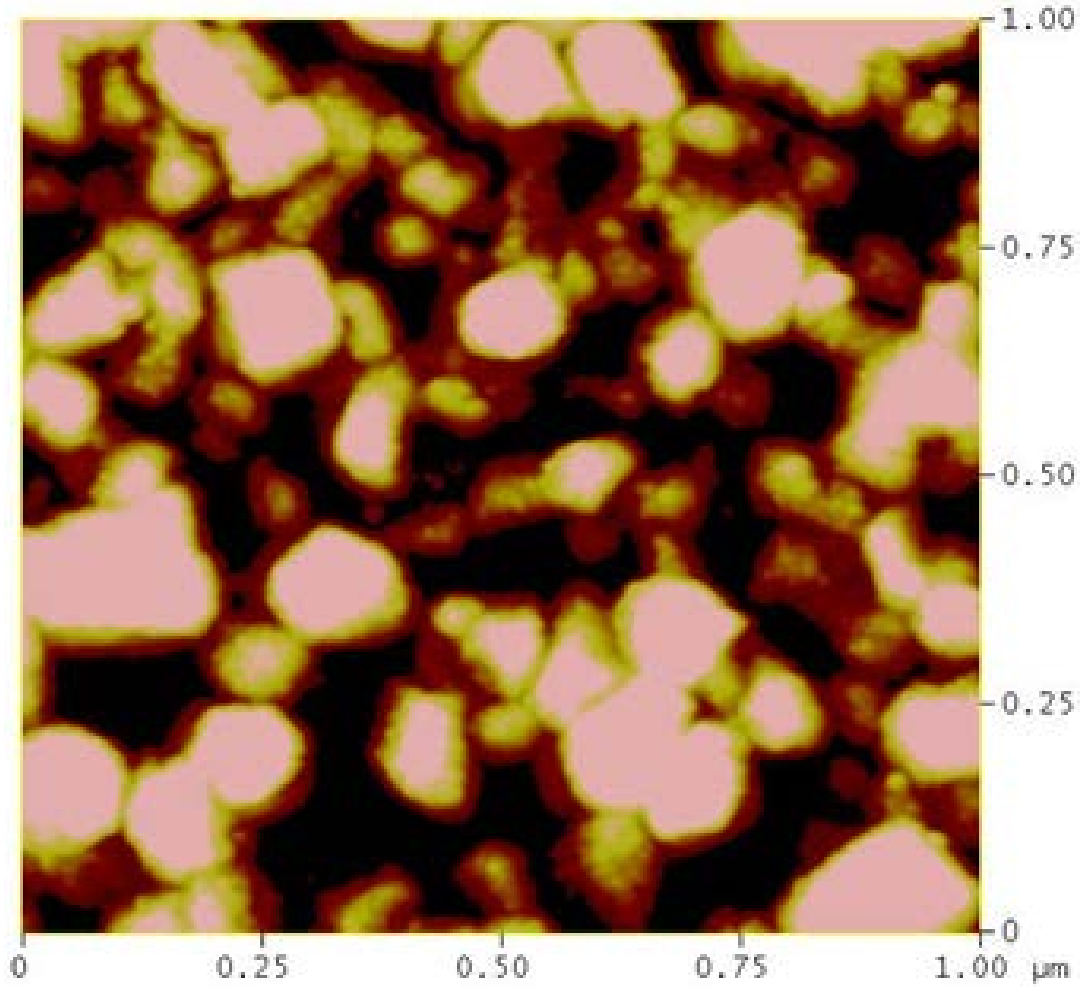
Ferroelektrik ince filmlerde gerçek kaçak akımı ölçmek oldukça zordur. Cihazların kullanımı esnasında aşırı güç kaybı ve bazı durumlarda cihazların performansını önemli ölçüde etkilediğinden dolayı kaçak akımın mümkün olduğu kadar az olması arzu edilen bir

durumdur (Parker, 1990). Bir elektriksel alan altında kaçak akımda meydana gelen ani bir artış elektriksel bozunma olarak bilinir. Isısal bozulmayı önlemek için kaçak akımın doğasını anlamak önemlidir. Eğer kaçak akım çok büyük olursa kapasitörde depolanan yükü tutmak da çok zor olacaktır. Yapılan çalışmalarda kaçak akımın geleneksel problemi ince filmlerin film/elektrot ara yüzeyi, kimyasal homojenliği, kristallenme kalitesi ve yüzey pürüzlülüğü gibi etki faktörleri dikkate alınarak çözümlenmeye çalışılmıştır. Kaçak akımı azaltmak için çözümler sadece iletim mekanizmasının doğru anlaşılmasının yanı sıra diğer mikroskobik özellikler üzerindeki kaçak akımın etkisiyle de bulunabilir. Akım-voltaj (I-V) karakteristikleri üzerindeki yüksek alanların etkileri başlıca ya taşıyıcıların (elektronlar ve holler) dağılım fonksiyonunun ve devingenliğinin (mobility) değişmesinden ya da taşıyıcı üretimi veya enjeksiyon oranının değişmesinden ya da her ikisinden kaynaklanır (Pingxiong ve ark., 1998). Yalıtkan ince filmler boyunca taşıyıcıların (elektronlar ve holler) taşınım mekanizmaları yoğun teoriksel ve deneysel araştırmalara konu olmuştur. Ferroelektrik ince filmlerde kaçak akımların karakteristikleri araştırılmıştır ve oksijen boşluk difüzyonu, zerre sınırı potansiyel engel yüksekliği, Fowler-Nordheim tünellemesi (FNT), uzay yükü sınırlı akımlar (SCLC), Poole-Frenkel emisyonu (PFE) ve Schoottky emisyonu (SE) gibi çeşitli iletim modelleri önerilmiştir (Yoo ve ark., 1993). Bunlardan başka farklı fiziksel kökenler: elektrot türleri, yük enjeksiyonu, film kompozisyonları ve mikroyapıda önerilmiştir.

Ferroelektrik kapasitör üzerine harici bir voltaj uygulayarak farklı sıcaklık aralıklarında I-V karakteristiğini kaydederek deneysel eğrinin yukarıda bahsedilen iletim mekanizmalarından birine uyup uymadığı kontrol edilir. Bu iletim mekanizmalarından daha fazlası deneysel eğriye uyarsa problem ortaya çıkar. Baskın iletim mekanizmasının bilinmesi kaçak akım seviyesini azaltmak için kullanılabilir. Bunlardan başka farklı fiziksel kökenler: elektrot türleri, yük enjeksiyonu, film kompozisyonları ve mikroyapıda önerilmiştir (Scott ve ark., 1991).

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 5. 1 Pt/TiO₂/SiO₂/Si yüzeyler üzerinde 750 °C' de tavlanan SBT ince filmin AFM görüntüsünü göstermektedir. AFM görüntüsünden görülebildiği gibi çoğunlukla küresel şekilli büyük ve küçük zerrelili, iki şekilli homojen olmayan bir mikroyapı görülmektedir. Burada zerrelere zerre sınırları ve zerrelere arası gözenekler ile birbirlerinden ayrılmaktadır.



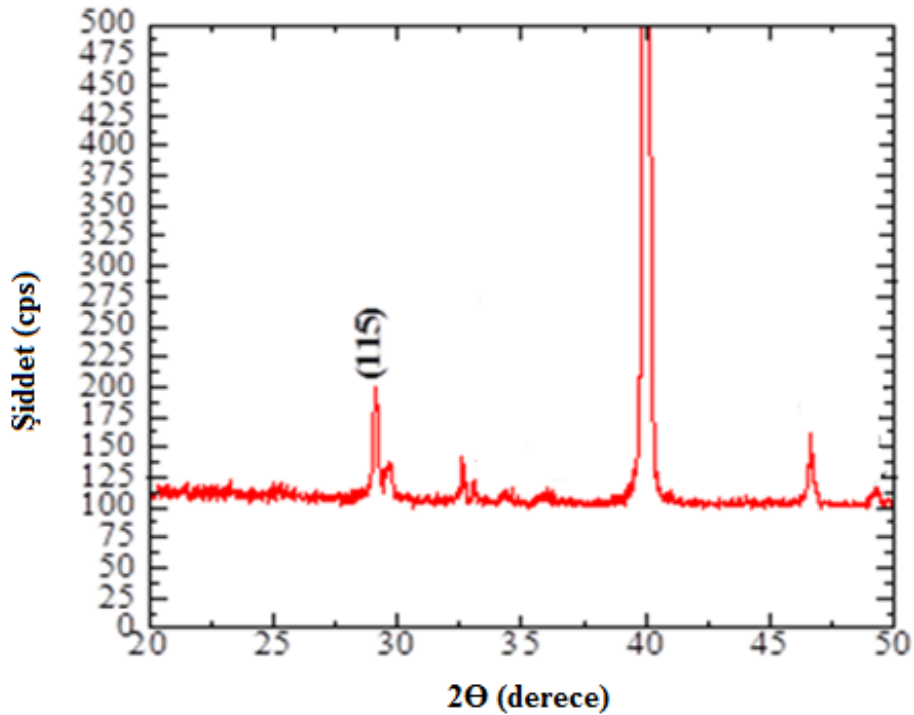
Şekil 5. 1. Pt/TiO₂/SiO₂/Si yüzeyler üzerinde 750 °C' de tavlanan SBT ince filmin AFM görüntüsü

Ufak zerrelere boyutu ortalama 70 nm iken, büyük zerrelere boyutu ortalama boyutu 120 nm civarındadır. SBT ince filmin yüzey pürüzlülüğü yaklaşık olarak 12 nm dir. Zerrelere boyutu ve şekli (özellikle büyük zerre boyutu) film pürüzlülüğü üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. İnce filmlere geleneksel tavlama süreci yüzey pürüzlülüğüne katkı sağlayan faktörlerden biri olan zerre büyümesine yol açar. SBT ince filmde meydana gelen yüzey pürüzlülüğü değişik boyutlarda ve şekillerde oluşan zerrelere varlığına atfedilebilir. AFM' deki koyu bölgeler

derinlerdeki zerrelere, gözenekliliği veya farklı boyutlardaki ikincil fazların varlığını gösterebilir. Sol-jel üretim tekniğinin olağan süreçleri olan sıcak tablada kurutma ve 750 °C de kristallenme için tavlama sonrası SBT ince filmlerin yüzey morfolojisinin pürüzlülüğünden dolayı düşük gerilim altında bile film profil kalınlığının belirgin farklılık göstermesiyle üst ve alt elektrotlar arası mesafede büyük farklılıkların oluşması ince film malzemenin elektriksel karakterizasyon sürecinde geri dönüşümsüz elektriksel bozunmasına (yanmasına(breakdown)) yol açacaktır..

Üretilen ince film malzeme için bir altlık olarak kullanılan elektrotlar, film/elektrot ara yüzeyi yüzeyi, kullanılan termal işlemlerin türü ve oranı, ince filmin üretim tekniği ve depolama parametreleri gibi etkenler zerre boyu ve şekli, filmin kristallenme kalitesi, film pürüzlülüğü üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Mikroyapıdaki bu tür olumsuzluklar P-V, I-V, C-V gibi elektriksel özellikleri olumsuz şekilde etkileyebilecektir.

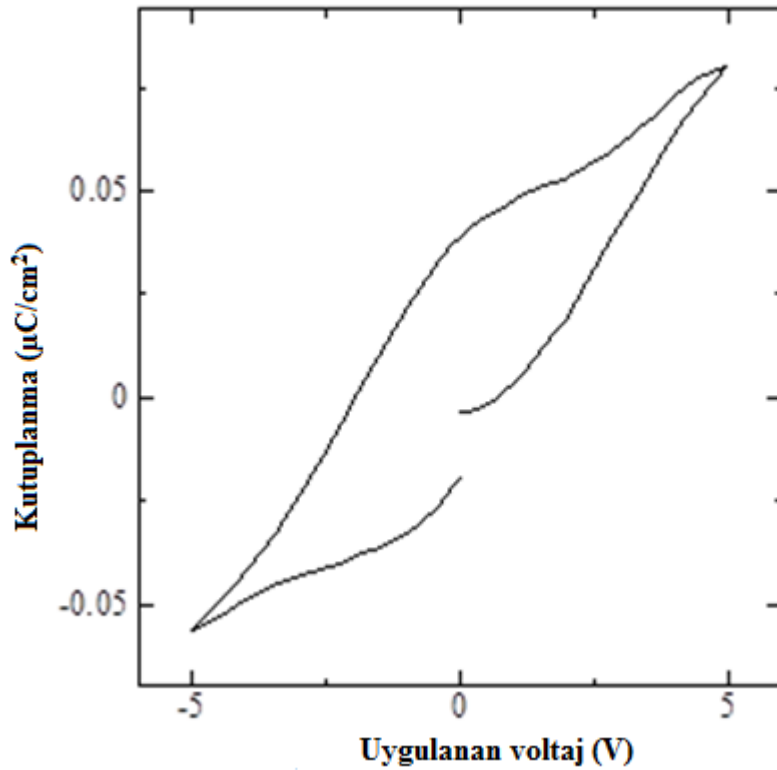
Şekil 5. 2 incelenen SBT ince filmin XRD kırınım desenini göstermektedir. SBT ferroelektrik ince filmler (115) ve diğer yönlerde polikristalize olmuştur ancak bu çok zayıf bir kristallenme göstermektedir.



Şekil 5. 2. Pt/TiO₂/SiO₂/Si yüzeyler üzerinde 750 °C' de tavlanan SBT ince filmin XRD kristal kırınım deseni

Zayıf kristallenme zayıf ferroelektriklik ve buna bağı olarak çok düşük polarizasyona neden olacaktır. İyi kristalize olan ince filmler keskin sivri uçlu yüksek pikler sergilerler. Fakat XRD deseninden görülebildiği gibi numunenin çok düşük şiddetli ve genişleyen pikler ile zayıf kristallenme gösterdiği görülmektedir. Bunun bir nedeni filmde küçük boyutlardaki kristal zerreciklerinin oluşumu ve buna bağı zayıf ferroelektriklik olabilir. Diğer olası bir sebep ise zayıf kristallenen filmlerin çok daha ufak kristal zerre boyutuna sahip olması olabilir. Zayıf kristallenme ve ferroelektriklik çok düşük polarizasyona ve zerrecikler arası sınırların neden olduğu yüksek kaçak akıma neden olacaktır. Ayrıca film yüzeyinde oluşabilecek mikrokırıklar da elektriksel özelliklerin zayıflamasında etkin mikroyapı olumsuzluklarıdır.

Şekil 5. 3 SBT ferroelektrik ince filmin histerise eğrisini (P-V) göstermektedir. Yukarıda bahsedilen olumsuz mikroyapı ve kristal yapıdan dolayı yüksek polarizasyonlu ve doyuma ulaşmış iyi bir P-V eğrisi elde edilememiştir.



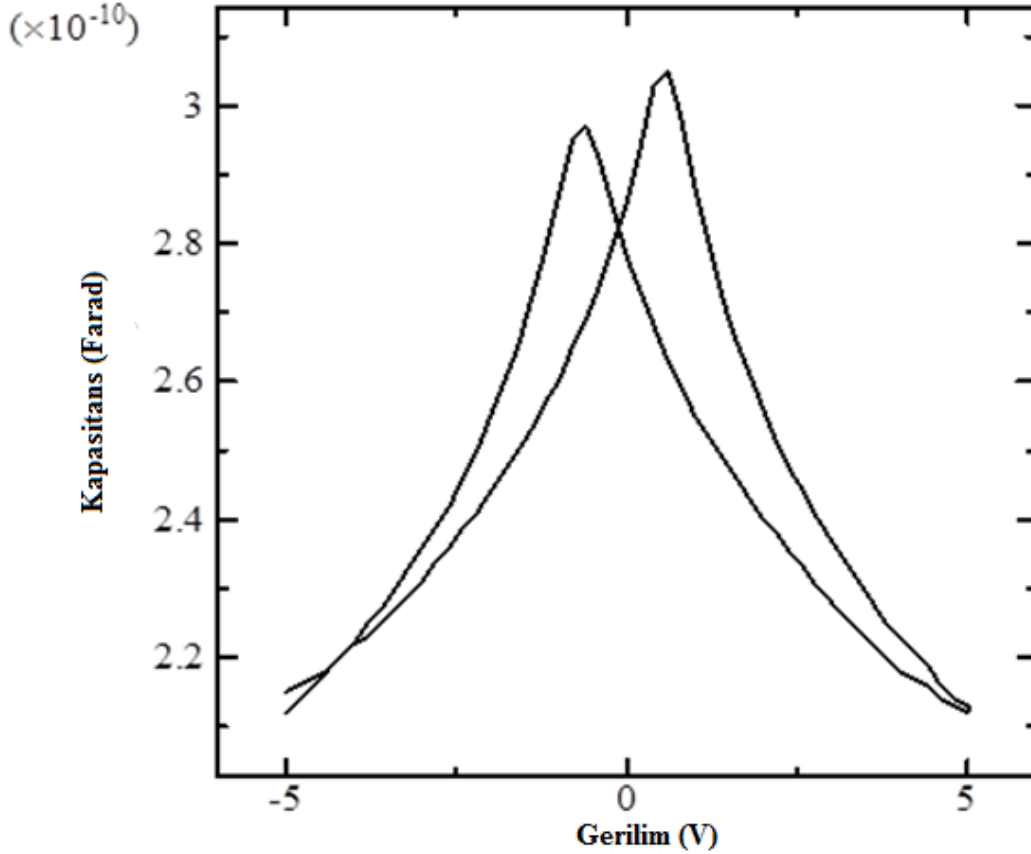
Şekil 5. 3. Pt/TiO₂/SiO₂/Si yüzeyler üzerinde 750 °C' de tavlanan SBT ferroelektrik ince filmin P-V histerise eğrisi

SBT ferroelektrik ince filmin bu şekilde P-V ferroelektrik davranışı zerrelerin boyutu ve şekliyle ilişkilendirilebilir. Polikristal ferroelektrik ince filmlerde zerre boyutu, domain yapısı elektriksel özellikleri belirleyen etkin faktördür. Kritik bir zerre boyutu SBT ferroelektrik ince filmler için yaklaşık olarak 80 nm civarındadır (Li ve ark., 2000). İyi kristalize olmayan bu ufak zerreler zayıf bir ferroelektrik özellikler sergiler. Bu boyut altındaki ufak zerreler tek bir domain yapısı sergileme eğilimindedir. Tek domaine yakın boyutlara sahip zerreler bir dış alan altında çok kararlıdır ve numunelerde domain çekirdeklenmesi zordur. Bu nedenle küçük bir kalıcı kutuplanma ufak zerrelili filmlerde beklenir. Diğer bir deyişle çoklu domainin baskın olduğu büyük zerreli filmler büyük kalıcı kutuplanmaya yol açan anahtarlanmayı daha kolay yapar. Bundan dolayı büyük zerre boyutlu SBT ince filmler daha iyi ferroelektrik özellikler gösterirler. Zerreler çok ufak olduğunda ferroelektrik malzemeler zayıf ferroelektrik davranışlar sergilerler. Ufak zerrelili filmlerde kutuplanma anahtarlanması genellikle zordur. Kalıcı kutuplanma değerinin SBT ince filmlerin kristallenme kalitesine, zerre boyutuna ve biçimine büyük ölçüde bağlı olmaktadır. Ferroelektrik malzemelerin aygıt uygulamaları domain yapısı, domain çekirdeklenmesi ve domain hareketliliği gibi özellikler tarafından etkilenir.

SBT ferroelektrik ince film numunenin zayıf elektriksel davranışı zerrelerin boyut ve şekli, yüzey pürüzlülüğü, gözenekliliği, kusurların yüksek seviyesi ve film/elektrot arayüzünün zayıf kalitesine de atfedilebilir. Zerre sınırlarında ve film elektrot arayüzünde yerleşen bizmut ve oksijen boşlukları gibi kusurlar ince filmin anahtarlanma özelliğini etkilemektedir. Bunlar domain duvarı tarafından yakalanabilir ve histerise eğrisinin biçimini etkileyen yerel bir stokimetre sapmaya neden olabilir. Domain duvarlarının sabitleme etkisi kusurlar ile kutuplanmada azalmaya neden olmaktadır. Anahtarlanma çevrimi esnasında yük kusurları oluşur ve bunlar uygulanan elektriksel alanın etkisinden dolayı domain sınırlarında birikebilir. Yük kusurları domainlerin belli bir yönünü kilitleyerek domain yönelimlerini engeller ve böylece domain duvarlarının hareketini zorlaştırır. Dolayısıyla bu sabitleme ferroelektrik histerise eğrisinin zorlayıcı alan değerini artırır ve ferroelektrik kutuplanmanın miktarını azaltır.

Şekil 5. 4 SBT ferroelektrik ince filmin C-V eğrisini göstermektedir. C-V eğrisindeki pikler bir yönden diğerine ferroelektrik domainin anahtarlanmasını gösteren büyük kutuplanma değişimini gösterir. Ferroelektrik numuneler kapasitans-voltaj (C-V) ilişkilerinde kelebek eğrisi (butterfly loop) karakteristiği sergilerler çünkü kapasitans artan ve azalan voltaj için farklıdır. Maksimum kapasitans kendiliğinden kutuplanma anahtarlanması

etrafında gözlenebilir. Bu dielektrik ve elektrot arasındaki arayüzeyde yük birikimi veya hareketli iyonların düşük bir konsantrasyonun var olduğunu gösterir.



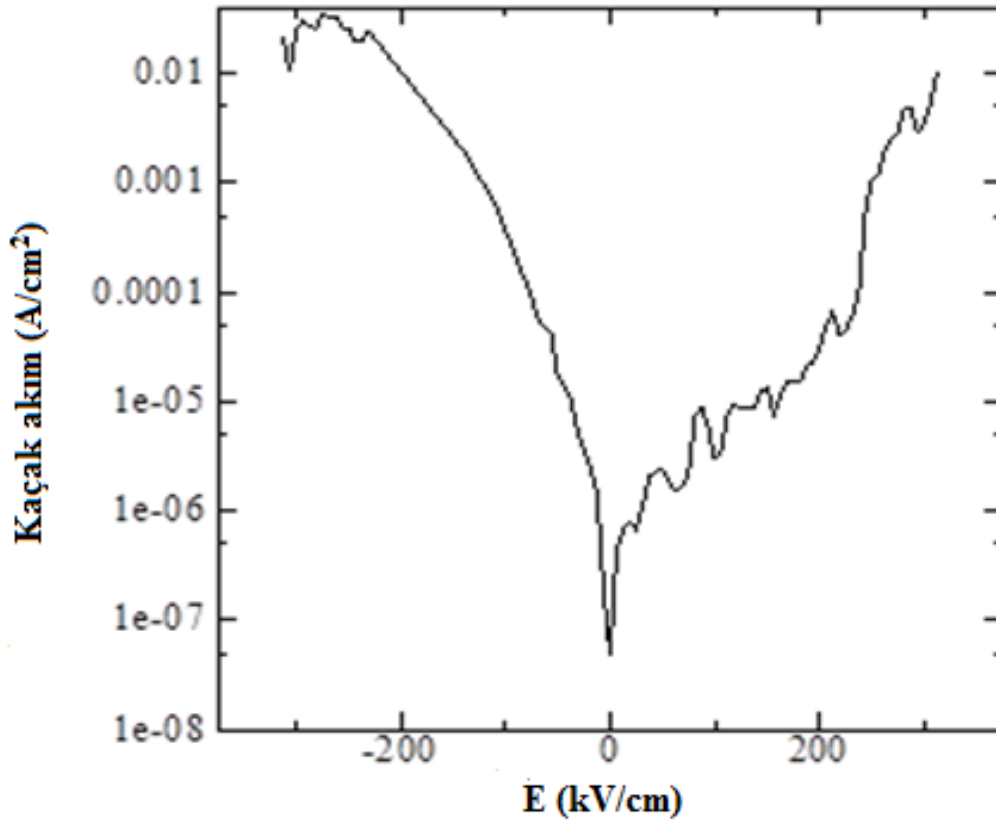
Şekil 5. 4. Pt/TiO₂/SiO₂/Si yüzeyler üzerinde 750 °C' de tavlanan SBT ferroelektrik ince filmin C-V eğrisi

Kapasitans–voltaj eğrisi simetrik olmayan bir değişim sergilemektedir. Bunun nedeni bir yönde zorlayıcı voltaj değerinde bir artış meydana geldiğini göstermektedir. Dielektrik sabiti domain duvarı ve onun hareketinin kolaylığı ile ilişkilidir. Pik yoğunluğu anahtarlanabilir kutuplanmanın miktarına bağlıdır. Yüksek kutuplanma daha yüksek dielektrik sabitine yol açar. Domain duvarının sabitleme etkisi kutuplanmanın azalmasına katkı sağlar. Büyük bir dielektrik sabiti iyi kristalize olan büyük zerrelili SBT ince filmlerde beklenir. Ufak zerrelili ince filmlerde daha çok sabitleme etkisi meydana geldiğinden dolayı ince filmlerde domain duvarında daha çok sabitleme etkisi meydana gelecektir. Domain duvarı hareketliliğinden dolayı anahtarlanma hızı azalacaktır ve böylece dielektrik sabitini düşürecektir.

Zerre boyutundaki artış dielektrik sabitini artırır ve domain duvarı hareketini daha kolay yapar. Dielektrik sabitindeki artış bazı domainlerin kısmen anahtarlanması nedeniyle ve kusursuz olan domain duvarının artan hareketi nedeniyledir. Bu durumda zorlayıcı alanın yeterince küçük olması beklenir. C-V eğrisindeki asimetri depolama koşullarına bağlı olarak film/elektrot arayüzeyinde meydana gelen farklılıklara atfedilebilir. Film/elektrot arayüzeyindeki farklılıklar nedeniyle domainlerin dönmesini engelleyen ekstra durumlar meydana gelebilir.

Dielektrik sabiti tavlama sıcaklığı, kusurlar, domain duvarları ve faz bileşimleri gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğu bilinmektedir (Simões ve ark., 2007).

Şekil 5. 5 SBT ferroelektrik ince film numunenin kaçak akım yoğunluğunu göstermektedir.



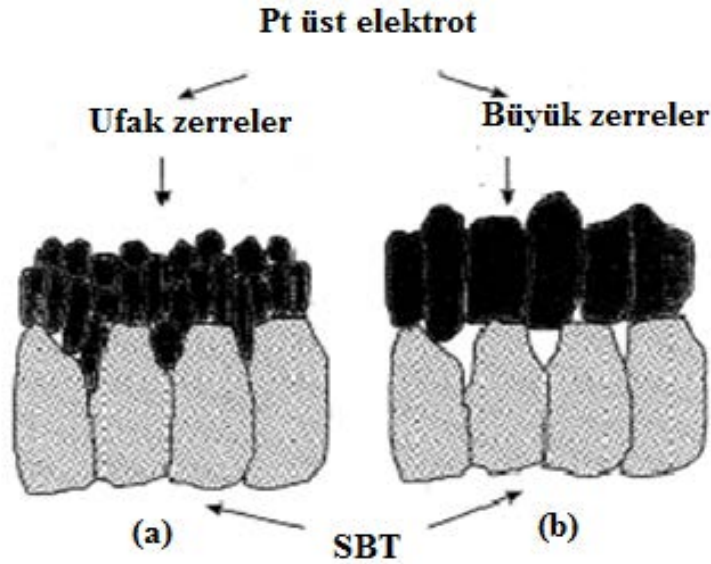
Şekil 5. 5. Pt/TiO₂/SiO₂/Si yüzeyler üzerinde 750 °C' de tavlanan SBT ferroelektrik ince filmin voltaja bağlı kaçak akım yoğunluğu

I-V karakteristiğine bağı olarak kaçak akım yoğunluğunun belirli elektriksel alan altındaki değerinin tespit edilmesi cihaz uygulamaları için önemli bir gereksinimdir. Üst elektrota uygulanan elektriksel alanın kutbuna bağı kalarak pozitif ve negatif elektriksel alan altında kaçak akımlarda güçlü bir asimetri gözlenmektedir. Bu durum alt ve üst elektrotlar arasındaki malzeme, kristal yapı ve mikroyapı gibi başta gelen farklılıktan kaynaklanmaktadır. Örneğin arayüzeylerdeki farklılıklara bu tür farklı simetrik elektriksel özelliklere göstermesine neden olabilir. Metal-Ferroelektrik-Metal (MFM) kapasitör yapıya uygulanan bir gerilim arayüzey bölgelerindeki bant bükülmelerini değıştirerek ve elektrotlardan yük taşıyıcılarını (elektronlar ve holler) enjekte ederek dengeyi bozulmasına yol açacaktır. Enjekte edilen taşıyıcıların bir miktarı arayüzey bölgelerinde tuzaklanır. Tuzaklar yapısal kusurlardan, safsızlıklardan veya her ikisinden de kaynaklanabilir. Tuzakların oluşumu ve dağılımını ince filmin depolama koşuluna, depolama sonrası yapılan işlemlerin türüne ve malzemenin kristallenme kalitesine bağıdır.

Bu çalışmadan elde edilen verilere göre akım-elektriksel alan karakteristiğini üç kısma ayrılabilir. İlk kısımda akım uygulanan elektriksel alana bağı olarak hemen hemen düz bir çizgi şeklinde artar. İkinci kısımda derinde tuzaklanan zerreler arası safsızlıklar (iyonlar ve elektronlar) iletme katkı sağlar. Bu bölgede filmdeki yük taşıyıcılarının (elektronlar ve holler) enjeksiyonu meydana gelir. Uygulanan elektriksel alan daha da artırılırsa yük taşıyıcıların daha güçlü enjeksiyonu meydana gelir ve doldurulmuş tuzak bölgelerinde yoğunluğun artışına sebep olur. Eğer yalıtıkana yeterince yük enjekte edilirse bütün tuzaklar doldurulmuş olacaktır. Daha fazla enjekte edilen yük iletim bandında serbest yük olarak bulunur ve iletme katkıda bulunur. Düşük voltaj bölgesinde taşıyıcılar tuzakların etrafında kaçak akım yoğunluğunu azaltarak yerleşik olurlar. Yüksek elektriksel alan bölgelerinde yerleşen taşıyıcılar tuzakların dışına çıkmaya başlarlar ve kaçak akımın çok büyük bir artışıyla sonuçlanır. Bir kaçak akım yoğunluğu eğrisindeki ani bir dikey sıçramalar bozulma (yanma veya breakdown) veya indüklenen elektriksel alan ile dolu tuzakların boşalması veya dolu tuzakların iyonlaşma etkisinden dolayı ortaya çıkar. Üçüncü kısımda uygulanan elektriksel alan artırıldıkça bozunmaya yol açan keskin bir artış görülür. Ferroelektrik ince filmdeki elektriksel karakterizasyon sürecinde düşük alanlarda meydana gelen bozulma yüzey üzerindeki gözenekler ve boşlukların yüksek seviyesine de bağılanabilir. Çünkü bu gözenekler ve boşlukların varlığı kritik kusurlar gibi hareket edebilir (Simões ve ark., 2008). Dolayısıyla gözlenen yüksek kaçak akım kristallenmedeki farklılıklar nedeniyle zerre boyutundaki ve yüzey mikroyapısındaki farklılığa atfedilebilir.

Film elektrot arayüzeyi ve SBT ince filmin yüzey morfolojisi MFM şeklindeki kapasitörlerin kaçak akımını belirlemede önemli rol oynar. Özellikle SBT ince filmlerin yüzey morfolojisinin kaçak akım, bozulma voltajı ve entegrasyon sürecini etkilediği bilinmektedir. Kullanılan elektrotlar ince filmin kristallenmesinde ve film pürüzlülüğünde önemli rol oynar. Kaçak akım davranışı ince filmin yüzey pürüzlülüğüne önemli ölçüde bağlıdır ve artan film pürüzlülüğü ile artar. Pürüzlü yüzeyler yarıiletken/oksit arayüzeyinde tersinim (inversion) tabakası üzerinde kuvvetli bir etkiye sahip olabilir çünkü elektronik enerji seviyelerinin yer değiştirmesine neden olabilir. Bu durum cihazın işlevini değiştirebilir. Kaçak akım yer, yer değişen yerel elektriksel alan nedeniyle ve meydana gelen yüzey yüksekliğinin yükselip alçalması nedeniyle ince filmlerin yüzey pürüzlülüğündeki artış ile artar. Belli bir gerilim yüzeyi pürüzlü bir ince film kapasitöre uygulandığında elektriksel alan zerreler arası derin dalgalanmalar arasındaki çukurlarda daha yüksek olacak. Bunun sonucu olarak elektriksel yüklere daha yüksek kuvvet uygulanarak ivmelenmeleri sağlanacak ve nihayetinde de daha yüksek kaçak akım yoğunluğu ölçülecektir.

Şekil 5. 6 (a) depolama sonrasında (b) tavlamadan sonra Pt/SBT arayüzeyinin morfolojik değişimini göstermektedir.

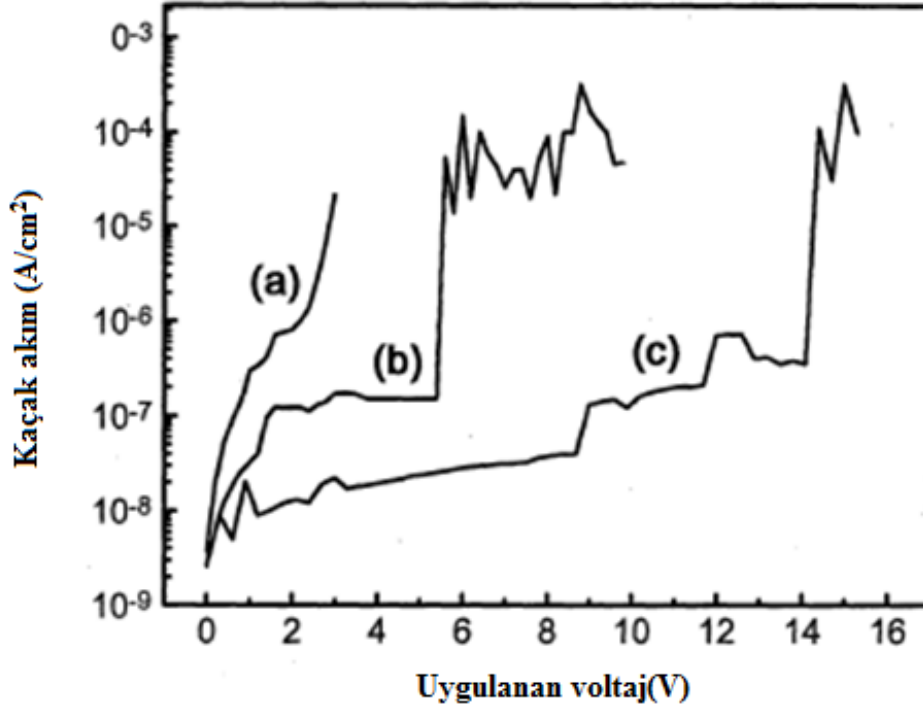


Şekil 5. 6. (a) depolama sonrasında (b) tavlamadan sonra Pt/SBT arayüzeyinin morfolojik değişimi (Shin, 1998)

Geleneksel tavlama sürecine bağılı olarak üst elektrot zerrelerinin büyüdüğü görülmektedir. Fakat üst elektrodun SBT ince filmin zerre büyümesini kısmen engellediği gözlemlenebilir. Bundan başka kullanılan alt elektrotlarda zerrelerin boyutunu ve şeklini, filmin kristallenme kalitesini ve yüzey pürüzlülüğünü üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Tavlama sürecine bağılı olarak Pt üst elektrot ve SBT ince filmi arasında meydana gelen arayüzeyin morfolojik değişimi ferroelektrik kapasitörün elektriksel özelliklerini etkileyecektir.

Şekil 5. 6 (a)'da görüldüğü gibi depolanan Pt/SBT arayüzeyindeki derin çukurlar platin (Pt) üst elektrodun ufak zerreleri ile dolabilir. Fakat tavlama süreci esnasında Pt nin ufak zerreleri zerre büyümesi nedeniyle büyük zerre şeklini alır. Bu yüzden zerre büyümesi nedeniyle pürüzsüz alt kısmı şekil 5. 6 (b)' de görüldüğü gibi boşluklara yol açan SBT ince filmin derin çukurlarını dolduramayacaktır.

Şekil 5. 7. (a) depolamadan sonra (b) 600 °C (c) 800 °C' de tavlanan Pt üst elektrotlu Pt/SBT/Pt/SiO₂/Si kapasitörün kaçak akım-voltaj karakteristiğini göstermektedir.

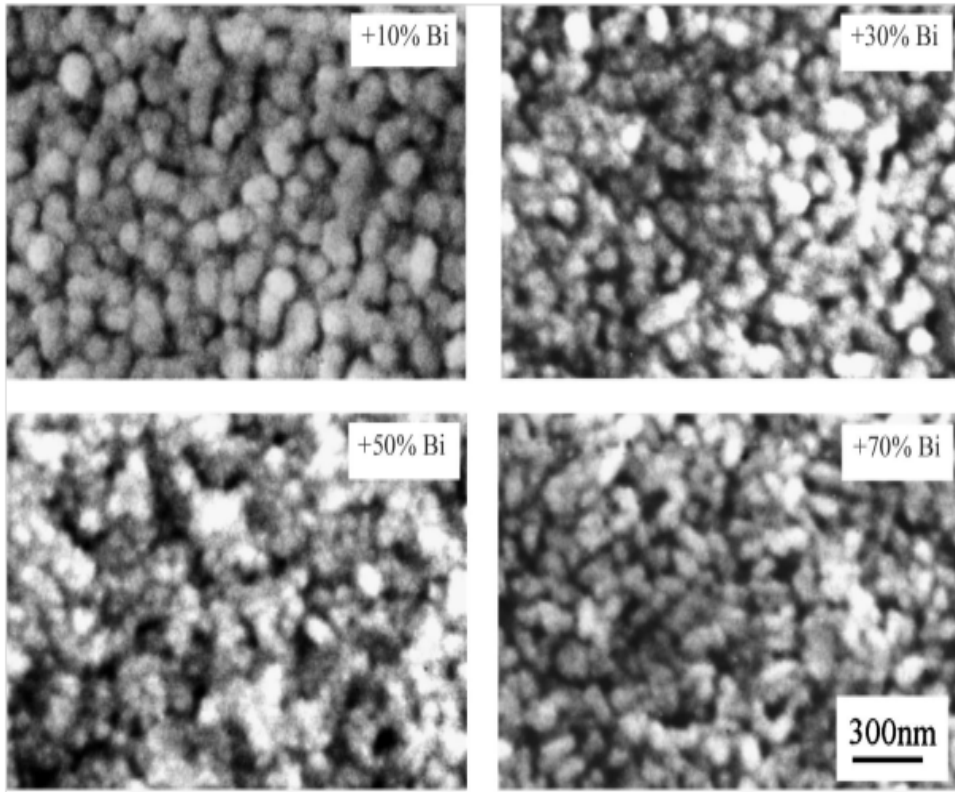


Şekil 5. 7. (a) depolandıktan sonra (b) 600 °C (c) 800 °C' de tavlanan Pt üst elektrotlu Pt/SBT/Pt/SiO₂/Si kapasitörün kaçak akım-voltaj karakteristiği (Shin, 1998)

Depolanan kapasitörün kaçak akım yoğunluğu uygulanav 1V' ta ani bir artış göstermektedir. Fakat aynı numunenin farklı tavlama sıcaklığındaki kaçak akım yoğunluklarında azalma meydana geldiği görülebilir. Kaçak akımda meydana gelen azalma artan tavlama sıcaklığı ile iyi kristalize olan SBT zerrelere varlığını gösterebilir. Bu sonuçlar derin ve dar çukurların depolama işleminden sonra ufak Pt zerreleri ile doldurulduğunda artan yüzey pürüzlülüğü ile artan kaçak akıma yol açtığını gösterir. Artan tavlama sıcaklığı ve azalan yüzey pürüzlülüğü ile kaçak akımın azaldığı görülmektedir.

SBT ince filmlerin yüzey morfolojisi ve elektriksel özellikleri kimyasal kompozisyonuyla yakından ilişkilidir. Ekstra bizmut tavlama esnasında bizmutun yüksek uçuculuğu ve alt elektrot içine bizmutun difüzyonu nedeniyle bizmut kaybını önlemek için gereklidir. Tavlama boyunca SBT deki bizmut miktarı yüksek uçuculuğu nedeniyle ferroelektrik özellikler ve kristallenme süreci için çok önemlidir.

Şekil 5. 8 MOD tekniği ile Pt/TiO₂/SiO₂/Si yüzeyler üzerinde hazırlanan fazla bizmut miktarlı SBT ince filmlerin yüzey morfolojisini göstermektedir.

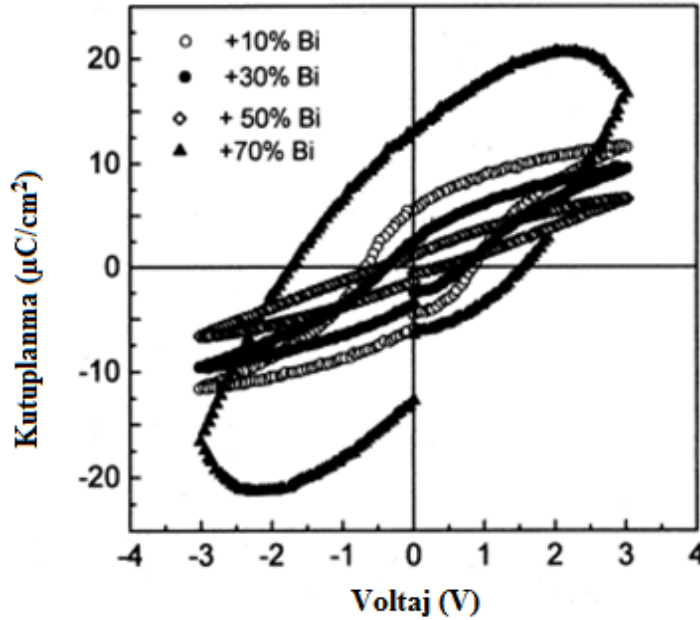


Şekil 5. 8. 750 °C' de tavlanan ekstra bizmut miktarlı SBT ince filmin SEM görüntüsü (Li, 2000)

Baskın bir bizmut tabakalı perovskit benzeri yapı %30 dan fazla bizmut miktarı içeren SBT ince filmde oluşmuştur. %10 ekstra bizmut miktarı içeren filmlerin 120 nm boyutunda yoğun küresel zerrelere sahip olduğu görülmektedir. %30 ve üzerinde ekstra bizmut miktarı içeren SBT ince filmlerde ikincil fazların meydana geldiği görülmektedir. Polikristal ferroelektrikler için ikincil fazlar katkı derişimi çözünürlük sınırını aştığında yüksek katkı derişimleri tarafından oluşabilir. Bu ikincil fazlar numuneyi katılaştırma işlemi boyunca zerre yüzeylerini kaplar ve zerre sınırlarında yüzey yüklerine yol açar.

Bizmut miktarı %50 artırıldığında yüzey mikroyapısı ve morfoloji var olan ufak gözenekler ve daha ufak zerreler ile bozular. %50 altındaki fazla bizmutlu filmlerin yüzey pürüzlülüğü benzerdir ve 12 nm dir. %70 fazla bizmutlu filmler 18 nm büyük bir pürüzlülük ile çubuk benzeri zerreler sergiler. Bu durum bozulan SBT fazı ve ikincil fazlar ile ilişkilidir. Yüzey morfolojisi bizmut miktarının %70' e artırılmasıyla tamamen bozulduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan zerrelerin biçimi ve büyüklüğü bizmut miktarı ile değişmektedir.

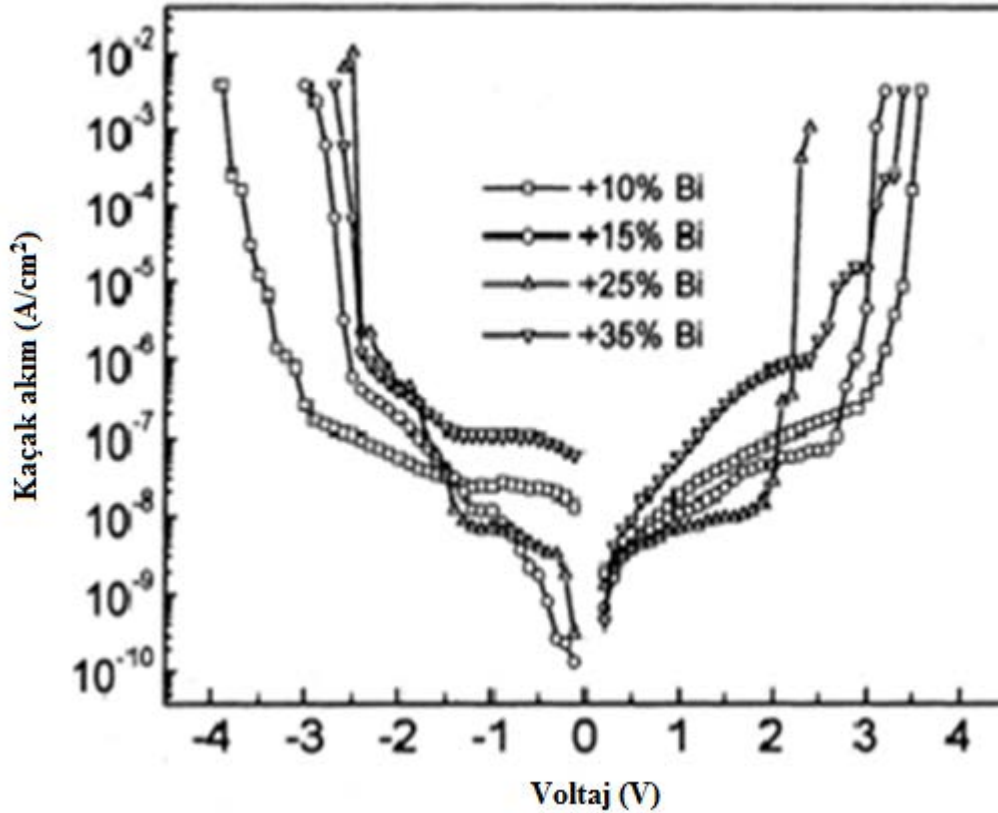
Şekil 5. 9 750 °C' de tavlanan ekstra bizmut miktarlı SBT ince filmlerin histerise eğrisini göstermektedir.



Şekil 5. 9. 750 °C' de tavlanan ekstra bizmut miktarlı SBT ince filmin histerise eğrisi (Li, 2000)

%50 ekstra bizmut bileşiminin artırılmasıyla kalıcı kutuplanma azalmıştır ki bu durum ufak zerre boyutuyla ve ikincil fazın varlığı ile ilişkilendirilebilir. %70 ekstra bizmutlu filmler, iletken Bi_2O_3 nedeniyle yüksek kaçak akım sergilemesinden dolayı zayıf histerise eğrisi göstermektedir.

Şekil 5. 10. 750 °C' de tavlanan fazla bizmut miktarlı SBT ince filmin kaçak akım yoğunluğunu göstermektedir. Uygulanan gerilim 4V a kadar arttırıldığında kaçak akım yoğunluğunun hızlı bir şekilde yükseldiği gözükmemektedir. Bu tuzakların sürekli bir dağılımı nedeniyle olabilir.



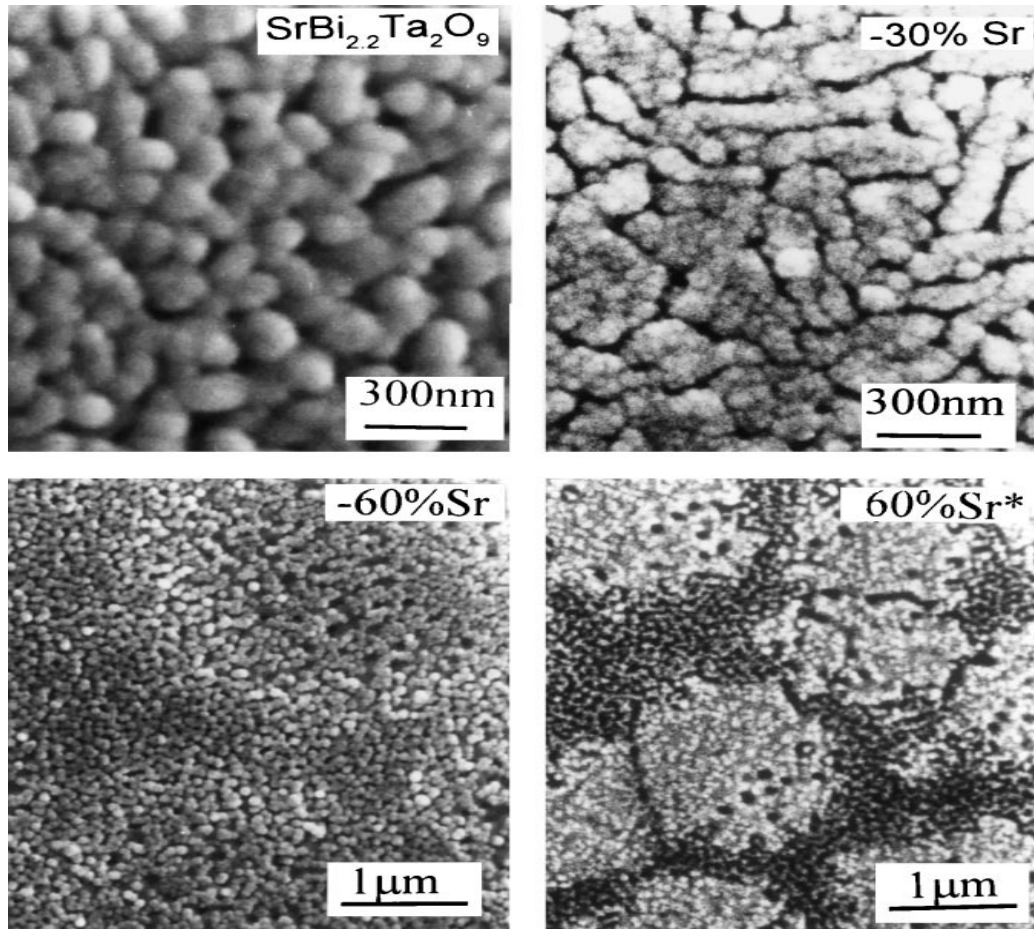
Şekil 5. 10. 750 °C' de tavlanan ekstra bizmut miktarlı SBT ince filmin kaçak akım yoğunluğu (Li, 2000)

%35 ekstra bizmutlu SBT ince filmler daha yüksek bir kaçak akıma sahiptir. İkincil faz ve stokimetriden keskin bir sapma yüksek kaçak akım için olası bir sebep olabilir. Deneysel verilerin sonuçlarından %10 ekstra bizmut miktarının zerre boyutu, yüzey morfolojisi ve elektriksel özelliklerle ilişkili olarak en uygun (optimum) bileşik olduğu

görülmektedir. Bizmut miktarının SBT ince filmin zerre boyutu, şekli, gözenekliliği, ikincil fazlar ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olduğu görülebilir.

Mikroyapıya bağlı olarak gözlenen zayıf elektriksel özellikler genellikle zerre sınırları arasındaki amorf fazın varlığına, yüksek kusur yoğunluğuna, boşluklara ve film/arayüzeyinin zayıf kalitesine atfedilebilir.

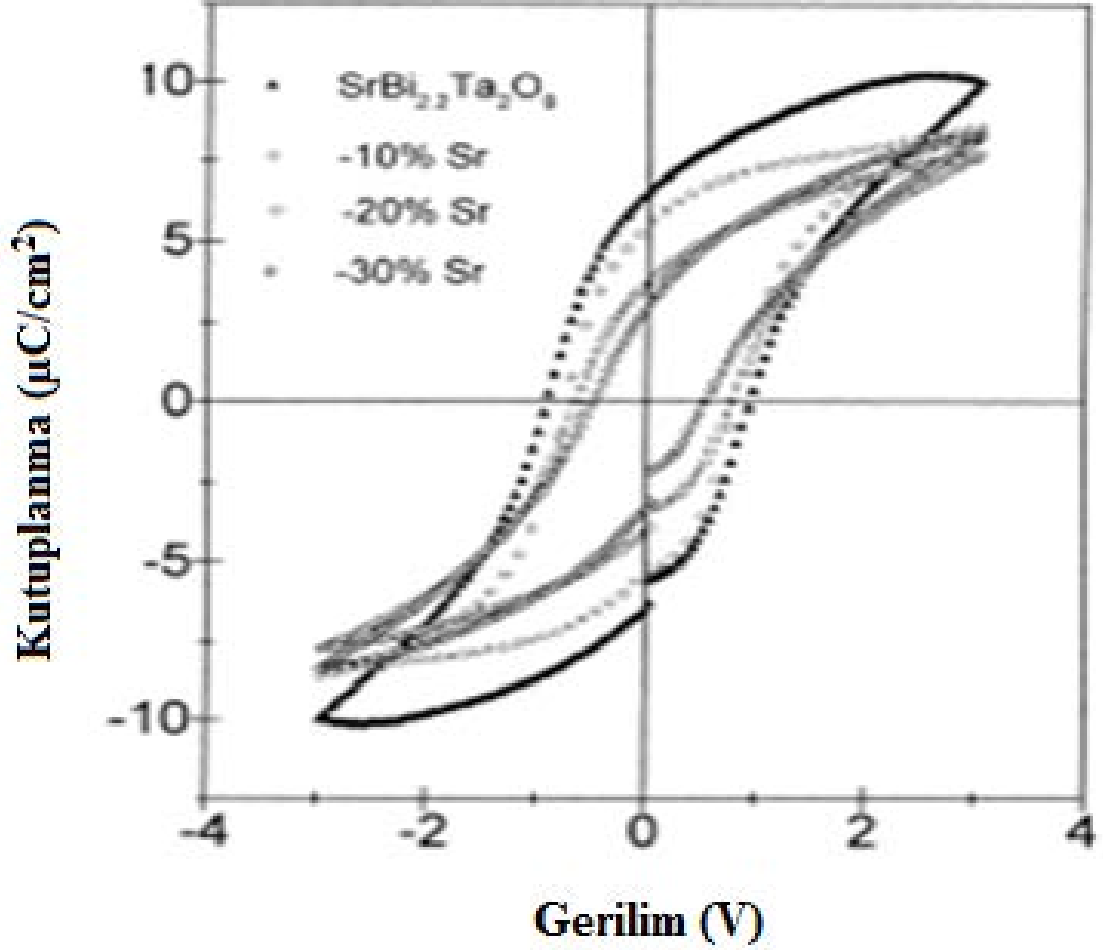
Şekil 5. 11 MOD tekniği kullanılarak Pt/TiO₂/SiO₂/Si yüzeyler üzerinde 750 °C' de hazırlanan eksik Sr miktarlı SBT ince filmlerin SEM görüntüsünü göstermektedir.



Şekil 5. 11. 750 °C' de tavlanan eksik Sr miktarlı SBT ince filmin SEM görüntüsü (Li, 2001)

Sitokimetric stronsiyum (Sr) filmler daha küresel ve yoğun zerrelere sahiptir. Sr miktarının %30 azaltılmasıyla çubuk benzeri zerrelere, daha fazla ufak gözenekler ve bazı amorf bölgeleri gözlenmektedir. %40 ve 60 Sr eksikli filmler (30-50 nm zerrelere) yoğun bölgeler ile benzer düzensiz morfoloji göstermektedir. Eksik Sr filmler amorf fazların

oluşumu ve daha ufak zerre boyutuyla ilişkili olan stokimetric filminden % 30-60 eksik Sr filmlere göre daha az zerre pürüzlülüğüne sahiptir.



Şekil 5. 12. 750 °C' de tavlanan eksik Sr miktarlı SBT ince filmin P-V grafiği (Li, 2001)

Şekil 5. 12 750 °C' de tavlanan eksik Sr miktarlı SBT ince filmin P-V grafiğini göstermektedir. Sr miktarının azaltılması ile kalıcı kutuplanma değerinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Bu durum bozulan tabakalı yapıya ve amorf fazın varlığına atfedilebilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bizmut tabaka yapılı bir ferroelektrik olan SBT ince filmlerin mikroyapısı, yüzey morfolojisi ve elektriksel özellikleri (kutuplanma, kapasitans ve kaçak akım) XRD, AFM ve elektriksel ölçümler (P-V, C-V, I-V) vasıtasıyla araştırılmıştır. İnce filmin AFM görüntülerinden mikroyapı kalitesine bakılarak zerrelerin boyutları, şekli ve diğer özellikleri tespit edildi. Ufak ve büyük zerreler olmak üzere homojen olmayan bir yapının oluştuğu gözlemlendi. Bu bağlamda P-V histerise eğrisindeki zayıf ferroelektrik özellikler zerre boyutundaki farklılıklara, gözenekliliğe ve yüksek kaçak akıma atfedildi. Düşük alanlarda kaçak akımdaki ani artış büyük ve küçük fraklı boyut ve şekillerdeki zerrelerden kaynaklanan yüzey pürüzlülüğü ve fazla miktardaki gözeneklilik ile ilişkilendirildi. İnce filmlerin kristallenme kalitesinin kullanılan termal işlem sıcaklığına bağlı olarak zerrelerin boyutunda ve şeklinde farklılıklar olduğu görüldü. Elde edilen mikroyapı verileri kapsamında zerrelerin boyutu ve şeklinin SBT ince filmlerin ferroelektrik ve elektriksel özellikleri üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu doğrulandı. Zerre boyutundaki artış ve biçimindeki değişikliğin yüzey pürüzlülüğünde farklılıklar gösterdiği görüldü. Artan yüzey pürüzlülüğü ile ferroelektrik malzemelerin kutuplanma, kapasitans ve kaçak akım elektriksel özellikleri farklılıklar sergiledi. Altlık olarak kullanılan elektrotların filmin kristallenmesinde, zerrelerin boyutunda ve şeklinde, yüzey pürüzlülüğünde nasıl bir etkiye sahip olduğu incelendi.

Bunların yanı sıra SBT ince filmlerin kimyasal bileşimiyle ilgili olarak Bi miktarının artırılması ve Sr miktarının azaltılmasına bağlı olarak mikroyapı değişimi altında zerre boyutunda, biçiminde ve yüzey pürüzlülüğünde farklılıklar olduğu görülmektedir. Mikroyapısına bağlı olarak SBT nin elektriksel özelliklerinde farklılıklar olduğu gözlemlendi. Deneysel verilerden anlaşıldığı üzere bizmut tabaka yapılı ferroelektriklerin en önemli temsilcisi olan SBT ferroelektrik ince filmlerin kimyasal bileşiminin de zerre boyutu, şekli, yüzey pürüzlülüğü ve kristallenmesi üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı diğer bizmut tabaka yapılı ferroelektriklerde olduğu gibi SBT ince filmlerin kimyasal kompozisyonu ve mikroyapısının kontrolü bu malzemelerin elektronik aygıt uygulamaları açısından oldukça büyük bir önem taşımaktadır.

Özellikle bellek uygulamaları için uzun vadede bilgi derleme ve cihaz güvenirligi sağlamak için ferroelektrik kristalin özgün kristal yapısı, mikroyapısı, arayüzey ve yüzey morfolojinin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda ferroelektrik ince film ferroelektrik olmayan diğer ikincil fazların olmadığı tek fazlı ve mümkün olduğunca homojen zerre yapısına sahip olmalıdır. Genel olarak ferroelektrik ince filmlerin ve bizmut tabaka yapıli ferroelektriklerin ve özel olarak SBT' nin iyi elektriksel özellikler sergileyebilmesi için mikrokırıklar ve diğer ölümcül yapısal kusurların olmadığı, film yüzey ve film-elektrot arayüzeylerinin mümkün olduğunca pürüzsüz, elektronik ve diğer yapısal kusurlardan kaynaklanabilecek hareketli serbest yüklerin olmadığı ve iyi kristalize olmuş ince film şeklinde üretilmesi gereklidir. Bütün bu özellikler bu tür ferroelektrik ince malzemeler için gerekli kimyasal sentezleme, alttaş ve elektrot malzemeleri, üretim sürecindeki ısısal uygulamalar ve tümüyle temiz oda koşullarındaki şartların iyi takip edilmesi ve geliştirilmesiyle elde edilebilecektir.

KAYNAKLAR

- Ahn, C. H., Rabe, K. M., Triscone, J. M., 2004. Local Polarization in Oxide Thin Films and Heterostructure. Vol. 303, s. 488-491.
- Alkoy, E. M., 2006. Study on Improvement of Fatigue Behaviour of Ferroelectric Pb(Zr,Ti)O₃ Thin Films Using PbZrO₃ Buffer Layers. Vol. 3, 32s.
- Arlt, G., 1990. The Influence of Microstructure on the Properties of Ferroelectric Ceramics. Ferroelectrics, Vol. 104, s. 217-227.
- Arlt, G., Hennings, D., With G., 1985. Dielectric Properties of Fine-grained Barium Titanate Ceramics. Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 58, 1619s.
- Bhattacharyya, M., Arockiarajan, A., 2013. Electrical Fatigue Behaviour in Lead Zirconate Titanate on Experimental.
- Black, J. S., 1985. Solid State Physics, Cambridge University Press.
- Bechhoefer, J., Deng, Y., Zylberber, J., Lei, C., Ye, Z. G., 2007. Temperature Dependence of the Capacitance of a Ferroelectric Material. Am. J. Phys., Vol. 75, 1046s.
- Bozgeyik, M. S., Cross, J. S., Ishiwara, H., and Shinozaki, K., 2009. Ferroelectric Properties of BaZrO₃ Doped SBT Thin Films. Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 48, s. 061403-061409.
- Buhay, H., Sinharoy, S., Kasner, W. H., Francombe, M. H., Lampe, D. R., and Stepke, E., 1991. Applied Physics Letters, 58s.
- Cai, W., Fu, C., Gao, J., Lin, Z., Deng, X., 2012. Effect of Hafnium on the Microstructure Dielectric and Ferroelectric Properties of BZT Seramics. Vol. 4906, 9s.
- Calzada, M., Poyato, R., López, G., Respaldiza, M. A., Ricote, J., Pardo, L. J., 2001.

- Sol-gel Derived SBT Films Crystallised with Low Temperatures and Short Times. *Ferroelectrics*, Vol. 267, s. 355-360.
- Celinska, J., Joshi, V., Narayan, S., Mcmillan, L., Araujo, C., 2003. Effect of Scaling the Film Thickness on the Ferroelectric Properties of SBT Ultra Thin Films. *Applied Physics Letters*, Vol. 82, 3937s.
- Chen, Y. T., Sheu, C. I., Liu, S. C., Cheng, S. Y., 2008. *Ceram. Int.*, Vol. 34, s. 621-624.
- Cheon, I. C., Kim, J. S., 1998. Crystal Structure, Microstructure and Electrical Properties in Nonstoichiometric SBT Thin Films. *Integrated Ferroelectrics*, Vol. 21, s. 229-240.
- Chochran, W., 1960. *Crystal Stability and the Theory of Ferroelectricity*.
- Chou, Y., Lee, E., Lin, M., Tseng, T. Y., 2009. *Ferroelectrics*, Vol. 382, s. 92-99.
- Chou, Y. H., Chen, T. M., Tseng, T. Y., 2003. Electrical and Dielectric Properties of Low Temperature Crystallized $\text{Sr}_{0.8}\text{Bi}_{2.6}\text{Ta}_2\text{O}_{9+x}$ Thin Films on Ir/SiO₂/Si Substrates. *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 82, 826s.
- Cole, M. W., Joshi, P. C., Ervin, M. H., Wood, M. C., Pfeffer, R. L., 2000. The Influence of Mg Doping on the Materials Properties of $\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$ Thin Films for Tunable Device Applications. *Thin Solid Films*, Vol. 374, s. 34-41.
- Coondo, I., Jha, A. K., Agarwal, S. K., 2006. Wolframium Doped $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ - Effect on Microstructural, Dielectric and Ferroelectric Properties. *Ferroelectrics*, Vol. 356: 1, s. 31-39.
- Czekaj, D., Jaszczyszyn, E., Orkisz, T., Kozielski, L., Czekaj, L., Federowicz, E., Moodelski, J. 2006. Synthesis and Basic Properties of Ferroelectric Thin Films. s. 629-699.
- Damjanovic, D., 2005. Hysteresis in Piezoelectric and Ferroelectric Materials. *The Science of Hysteresis*, Vol. 3, s. 348-353.

- Damjanovic, D., 1998. Ferroelectric, Dielectric and Piezoelectric Properties of Ferroelectric Thin Films and Ceramics. *Rep. Prog. Phys.*, Vol.61, s.1267-1324.
- Dawber, M., Rabbe, K. M., Scott, J. F., 2005. Physics of Thin Film Ferroelectric Oxides. *Review Of Modern Physics*, Vol. 77, no: 4, s. 1083-1130.
- Duiker, D. M., Beale, P. D., Scott, J. F., Paz de Araujo, C. A., Melnick, B. M., Cuchiario, Z. E., McMillan, L. D., 1990. *Journal of Applied Physics*, Vol. 68, 5783s.
- Goodman, G., 1986. *Ceramics Materials for Electronics*.
- Gupta, H. C., Archana and Lutra V., 2010. *J. Mol. Struct*, 984s.
- Guo, D. Y., Li, M. Y. Pei, L., 2007. Ferroelectric Properties of $\text{Bi}_{3.25}\text{La}_{0.75}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ Thin Films Prepared by Sol-gel Method. *Ser E-Tech Sci.*, Vol. 50, s.1-6.
- Haiyan, H., 2009. Processing Dependences of Microstructure of Ferroelectric Thin Films. *Recent Patents on Material Science*, Vol. 2, 58s.
- Haertling, J. 1999. *Ferroelectric Ceramics: History and Technology*. *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 82, 797s.
- Hsu, Y. F., Leu, C. C., Chien, H. C., Hu, C. T., 2006. Influence of Ta Content on the Physical Properties of SBT Ferroelectric Thin Films. *J. Mater. Res.*, Vol. 21, s. 3125-3133.
- Hsu, Y. F., Leu, C. C., Chien, H. C., Hu, C.T., 2007. Physical and Electrical Characteristics Of SBT Ferroelectric Thin Films with Different Thickness and Varried Stress During Annealing.
- Hu, G. D., Wilson, I. H., Xu, J. B., Li, C. P., Wong, S. P., 2000. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, 1758s.
- Hu, H., Krupanidhi, S. B., 1994. Current-Voltage Characteristics of Ultrafine-Grained Ferroelectric $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ Thin Films. *J. Mater. Res.*, Vol. 9, 1484s.

- Hubert, T., Beck, U., Kleinke, H., 1996. Non-Cryst. Solid.
- Ishiwara, H., 2000. Current Status and Prospects of FET-type Ferroelectric Memories. FED Journal Vol. 11, 27s.
- Izyumskaya, N., Alivov, Y. L., Cho, S. J., Morkoç, H., Lee H., Kang Y. S., 2007. Processing Structure, Properties and Applications of PZT Thin Films. Critical Reviews in Solid Materials Science. Vol. 32, s. 111-202.
- Jeffrey, B. C., George, W., Scherer, 1990. Sol-gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-gel Processing, 908s.
- Kim, Y. S., Lee, Y. H., Lin, K. M., Sung, M. Y., 1999. Appl. Phys. Lett., Vol. 74, 2800s.
- Kumar, S. N.İ., 2012. Synthesis Characterization of $\text{Sr}_{0.53}\text{Ba}_{0.47}\text{Nb}_2\text{O}_6$ Based Ferroelectric Composites for Pyroelectric Applications. Vol. 1, 10s.
- Lang, S. B., 1974. Sourcebook of Pyroelectricity (Gordon and Breach, New York).
- Lee, Yi H., Ming, W. J., Chueh, Yu, L., Chou, Li J., 2005. Low Temperature Growth and Interface Characterization of BiFeO_3 Thin Films with Reduced Leakage Current. Appl. Phys. Lett., Vol. 87, 87s.
- Lee, K., Rhee, B., Lee, C., 2001. Leakage Current-Voltage Characteristics of Ferroelectric Thin Film Capacitors. Journal of the Korean Physical Society, Vol. 38, s-723-728.
- Lente, M. H., Bacichetti, A. L., Mendes, R. G., Eiras, J. A., 2004. Nonlinear Dielectric Response in Ferroelectric Thin Films. Bol. Soc. Esp. Ceram., Vol. 44, s. 815-818.
- Levasseur, D., Shaarawi, H.B., Pacchini, S., Rousseau, A., Payan, S., Guegan, G., Maglione M., 2013. Systematic Investigation of the Annealing Temperature and Composition effects on the Dielectric Properties of Solgel BST Thin Films. Journal of the European Ceramic Society, Vol. 33, 139s.

- Li, A., Wu, D., Ling, H., Yu, T., Wang, M., Yin, X., Liu, Z., Ming, N., 2000. Thin Solid Films, Vol. 375, s. 215-219.
- Li, A., Wu, D., Ling, H., Yu, T., Wang, M., Yin, X., Liu, Z., Ming, N., 2001. Investigation of the Structural and Electrical Properties of $\text{Sr}_{1-x}\text{Bi}_{2.2}\text{Ta}_2\text{O}_9$ Thin Films with Deficient Sr Contents. Applied Surface Science, Vol. 173, s. 307-312.
- Li, A., Wu, D., Ling, H., Ling, H. Q., Wang, M., Liu, Z., Ming, N., 2002. Different Growth Behavior of SBT Ferroelectric Films Under Conventional and Rapid Annealing Processing by Metalorganic Decomposition. Journal of Crystal Growth, Vol. 235, s. 394-400.
- Lous, R. S. and Pinuaga, N. B., 2011. Ferroelectric Memory Devices, Vol. 1, s. 6-7.
- Meiya, L., Ling, P., Benfang, Y., Dongyun, G., Xiaohua, S., Xingzhong, Z., 2008. Prepared by Microstructures and Fatigue-free Properties of the La^{3+} and Nd^{3+} Doped $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ Thin Films Modified Sol-gel Technique. Science in China Series, Vol. 51, no. 11, s.1843- 1849.
- Meyer, R., Waser, R., Prume, K., Schmitz, T., Tiedke, S., 2005. Dynamic Leakage Current Compensation in Ferroelectric Thin Film Capacitor Structures. Applied Physics Letters. Vol. 86, 142907s.
- Mihara, T., Watanabe, H., Paz de Araujo, C. A., 1994. Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 1, s. 3996.
- Mikailzade, F., San, S., 2009. İstatiksel Mekanik, Vol. 2, s. 64-91.
- Moller, H. J., 1991. Prog. Mater., Vol. 35, 205s.
- Noda, M., Matsumoro, Y., Sugiyama, Okuyama, M., 1999. Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 1, 2275s.
- Nye, J. F., 1990. Physical Properties of Crystals (Clarendon Press, Oxford).
- Pardo, L., Ricote, J., 2011. Multifunctional Polycrystalline Ferroelectric Materials, Vol. 9,

409s.

Park, S. K., Baek, M. S., Bae, S. C., Kwun, S. Y., Tim, K. T., Kim, K. W., 1999. Solid State Commun., Vol. 111, 347s.

Parker, L. H., Tasch, A. F., 1990. IEEE Cir. Dev. Mag.

Pingxiong, Y. Hongmei, D. Junhao, C., 1998. Science in China (Series E), Vol. 41, s. 502-510.

Pintilie, L., Alexe, M., 2005. Journal of Applied Physics, Vol. 98, 12s.

Pintilie, L., Vrejoiu, I., Hesse, D., Lerhun, G., Alexe, M., 2007. Physical Review B, Vol. 75, 104103s.

Pintilie, L., Boerasu, I., Gomes, M. J., M., Zhao, T., Ramesh, R., Alexe, M., 2005. Journal of Applied Physics, Vol. 98, 12s.

Pontes, F. M., Santos, L. S., Rissato, S. R., Pontes, D. S. L., Leite, E. R., Claro, N. S., Chiquito, A. J., Pizani, P. S., 2008. Leakage Current, Ferroelectric and Structural Properties in PBT Thin Films Prepared by Chemical Route. Journal of Physics and Chemistry of Solids, Vol. 69, s. 2796-2803.

Rae, A. D., Thompson, J. G., Withers, R. L., 1992. Acta Crystallogr. B, Vol. 48, 418s.

Ramana, M. V., Kiran, S. R., Reddy, N. R., Kumar, K. V., Murthy, V. R., Murthy, B. S., 2011. Mater. Chem. Phys. Vol. 126, s. 295-300.

Ramesh, R., Aggarwal, S., Auciello, O., 2001. Materials Science and Engineering, Vol. 32, 191s.

Ren, S. B., Lu, C. J., Liu, J. S., Shen, H. M., Wang, Y. N., 1997., Phys. Rev. B, Vol. 55, 3485s.

Scott, J. F., Araujo, C. A., Melnick, B. M., McMillan, L. D., Zuleeg, R., 1991. J. Appl.

- Phys., Vol. 70, 382s.
- Scott, J. F., 1998. The Physics of Ferroelectric Ceramic Thin Films for Memory Applications Ferroelectric Review.
- Scott, J. F., 2000. Ferroelectric Memories, Springer Series in Advances Microelectronic.
- Setter, N., 2001. Journal of the European Ceramic Society, Vol. 21, s. 1279-1293.
- Shelke, V., Harshan, V. N., Kotru, S., Gupta, A., 2009. Effect of Kinetic Growth Parameters on Leakage Current and Ferroelectric Behavior of BiFeO₃ thin films. Journal of Applied Physics, Vol. 106, 104114s.
- Shimakawa, Y., ve Kubo, Y., 1999. Appl. Phys. Lett., Vol. 75, 2839s.
- Shin, D. S., Lee, H. N., Lee, C. W., Kim, Y. T., Choi, I. H., 1998. J. Appl. Phys, Vol. 37, s. 5189.
- Simões, A. Z., Ramírez, M. A., Longo, E., Varela, J. A., 2007. Ceramics International , Vol. 33, s. 1535-1541.
- Simões, A. Z., Ramírez, M. A., Longo, E., Varela, J. A., 2008. Material Chemistry and Physics, Vol. 107, s. 72-79.
- Stemmer, S., Streiffer, S. K., Einst, F., Ruhle, M, F., 1995. Phil. Mag. A.
- Strukov, B. A. Levanyuk A. P., 1998. Ferroelectric, Phenomena in Crystals: Physical Foundations.
- Subbanna, G. N., Row, T. N. G., Rao, C. N. R., 1990. Journal of Solid State Chemistry, Vol. 86, s. 206-211.
- Sugandha, Jha A. K., 2013. Nanocrystalline Non-stoichiometric SBT: Effect of Milling Duration on Structural and Electrical Characteristics. Material Research, Vol. 48, 1553s.
- Trainer, M., 2001. Ferroelectricity: Measurement of the Dielectric Susceptibility of Strontium

- Titanate at Low Temperatures. *Am. J. Phys.*, Vol. 9, s. 966-969.
- Valesek, J. Piezo-Electric and Allied Phenomena in Rochelle Salt. *Physical Review*, Vol. 7 s. 475-481.
- Xu, Y., 1991. *Ferroelectric Materials and Their Applications*.
- Yang, K. J., Kim, W. S., Park, H. H., 2001. Effect of Grain Size of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.4}\text{Ti}_{0.6})\text{O}_3$ Sol-gel Derived Thin Films on the Ferroelectric Properties. *Applied Surface Science*, Vol. 169, s. 544-548.
- Yoshimura, T., Fujimura, N., 2000. Characterization of Ferroelectricity in MFIS Structure by Pulsed C-V Measurement. *Journal of Applied Physics*, Vol. 87, 3444s.
- Wang, X., 2001. Electrical Characterizations of LiNbO_3 -Thin Films in a MIS Capacitor, Vol. 2, s. 30.
- Wang, J. T., Hall, S., Zhen, Y., Sun, Z. W., 2009. Displacive to Order-Disorder Two-Step Phase Transition Model for Para-Ferroelectric Transition Ferroelectrics. Vol. 386, s. 94-104.
- Waser, R., 1995. Polarization, Conduction and Breakdown in Non-Ferroelectric Pervskite Thin Films. *Science and Technology of Electroceramic Thin Films*, 224s.
- [http://www. Sistemakademi. Com](http://www.Sistemakademi.Com).
- [http://www. Wikipedia. Com](http://www.Wikipedia.Com).
- Zubko, S., 2007. *Ferroelektrics: Physics and Microwave Applications*.
- Zhao, Y. P., Wang, G. C., Lu, T. M., 1999. Surface-Roughness Effect on Capacitance and Leakage Current of a Insulating Film. *Physical Review B*, Vol. 60, s. 9157-9164.
- Zhou, D., Tang, Y., Wang, F., Xie D., Sun, D., Shi, W., Tian, L., Sun, J., Meng, X., Chu, j.,

Kong W., Lou, L., 2012. Improved Dielectric and Electrical Insulating Properties in PMNT Based Multilayer Ferroelectric Thin Films. *Thin Solid Films*, Vol. 522, 457s.

Zhu, X., Zhu, T., Liu, Z., Ming, N., 2001. Microstructures of Grain Boundaries in Oriented SBT Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition, *Applied Pysics A*, Vol. 72, s. 503-507.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı, soyadı : Nurvet KIRKGEÇİT
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 29.08.1987, Kahramanmaraş
e-posta : nurvetkrkgct@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	KSÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü	2014
Lisans	KSÜ / Fizik Bölümü	2010
Lise	Kadıköy Lisesi	2004

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Okumak, Belgesel izlemek, Yürüyüş yapmak