

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**ÇOK KATLI SÜPERİLETKEN YBCO İNCE
FİLMLERİN, SrTiO_3 ARA-KATMANLAR
KULLANILARAK ÜRETİLMESİ**

Yiğitcan UZUN

Tez Danışmanı : Yrd. Doç Dr. İlbeyi AVCI

Fizik Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 404.01.01

Sunuş Tarihi : 13.01.2015

Bornova-İZMİR

2015

Yiğitcan UZUN tarafından **Yüksek Lisans** tezi olarak sunulan “**Çok katlı süperiletken YBCO ince filmlerin SrTiO_3 ara-katmanlar kullanılarak üretilmesi**” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve **13.01.2015** tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Yrd. Doç. Dr. İlbeyi AVCI

Raportör Üye: Prof. Dr. Mustafa TEPE

Üye : Doç. Dr. Canan VARLIKLI

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “*Çok Katlı Süperiletken YBCO İnce Filmlerin, SrTiO₃ Ara-Katmanlar Kullanılarak Üretilmesi*” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

.... / / 20..

İmzası

Adı-Soyadı

ÖZET**ÇOK KATLI SÜPERİLETKEN YBCO İNCE FİLMLERİN, SrTiO_3
ARA-KATMANLAR KULLANILARAK ÜRETİLMESİ**

Yiğitcan UZUN

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. İlbeyi AVCI

Ocak 2015, 48 sayfa

Çok katlı süperiletken ince film yapıları, süperiletken mikro-elektronik aygıtlar için çok önemli olmasıyla birlikte, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) gibi yüksek sıcaklık süperiletkenleri kullanılarak elde edilmesi oldukça zordur. YBCO ince filmler kullanılarak üretilen çok katmanlı yapılar, birçok tampon tabakalar üzerine süperiletken tek YBCO ince film katmanının eklenmesiyle elde edilmiştir. Bu çalışmada ise birden fazla süperiletken YBCO ince filmler, SrTiO_3 (STO) ara katmanlar ile birbirlerinden yalıtılarak çok katmanlı süperiletken ince film yapısı üretilmiştir. YBCO ve STO ince film büyütme işlemleri sırasıyla dc ve rf magnetron püskürtme teknikleri için optimize edildi ve tek kristal (100) STO altıklar üzerine üretim gerçekleştirildi. YBCO ince filmlerin süperiletkenlik özellikleri, ac manyetik suseptibilite ve dc direnç – sıcaklık ölçümleriyle test edildi. Üretilen yapının aygıt uygulamalarında kullanılabilirliğini test etmek için, en üst YBCO katman mikro-köprüler şeklinde desenlendi ve bu aygıtın çok katmanlı yapı üzerindeki akım-gerilim performansı analiz edildi. Geliştirilen süperiletken çok katmanlı yapıları bir uygulama içerisinde gözlemleyebilmek için 3-katmanlı YBCO/STO/YBCO yapısı üretili. Üst YBCO ince film, mikro aygıt şeklinde desenlendi ve alt katmanda bulunan süperiletken YBCO ince filmin bu mikro aygıt üzerindeki manyetik kalkan performansı farklı büyüklüklerde uygulanan dış manyetik alanlar altında test edildi.

Anahtar sözcükler: YBCO ince film, Çok katmanlı yapılar, Manyetik kalkanlama, Süperiletken aygıtlar.

ABSTRACT**FABRICATION OF HIGH- T_c SUPERCONDUCTING
MULTILAYER STRUCTURE WITH $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ THIN FILMS
SEPARATED BY SrTiO_3 INTERLAYERS**

UZUN, Yiğitcan

MSc in Physics.

Supervisor: Assist. Prof. Dr. İlbeyi AVCI

January 2015, 48 pages

Multilayer thin film structures are attractive for superconducting microelectronics, but they are difficult to achieve on high T_c superconductors such as $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) thin films. The conventional process has been based on fabricating the YBCO thin films on multiple buffer layers resulting in a single superconducting upper layer on a multilayer-type structure, here we present a full fabrication process for the growth of a multilayer superconducting thin film structure that contains multiple superconducting YBCO thin film layers separated by SrTiO_3 (STO) interlayers in sandwich-type configuration. The deposition process was optimized for dc and rf magnetron sputtering techniques for the deposition of YBCO and STO thin films respectively. An YBCO/STO/YBCO/STO/YBCO type configuration was fabricated on a commercial single crystal (100) STO substrate by precisely tuning the deposition process parameters. Superconducting properties of YBCO layers were tested by ac magnetic susceptibility and resistances versus temperature measurements after the deposition of each additional layer. In order to demonstrate potential device application, a microbridge pattern was fabricated onto the top YBCO layer and current – voltage analysis was performed. Additionally a different type of multilayer structure was also fabricated in the form of YBCO/STO/YBCO in order to test magnetic shielding performance of superconducting YBCO thin film on an YBCO microbridge under the various applied external magnetic fields.

Keywords: YBCO Thin Films, Multilayer Structures, Magnetic Shielding, Superconducting Devices

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması ve 3 yıl süren yüksek lisans eğitimim boyunca, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, gelişimim için gerekli olan hertürlü olanakları bana sağlayan, maddi-manevi desteğini her zaman arkamda hissettiğim çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. İlbeyi AVCI' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmalarım boyunca yönelttiğim bütün sorulara her zaman cevaplar bulmaya çalışan ve bütün tecrübesini bana aktararak yola devam etmemi sağlayan çok değerli hocam Prof. Dr. Mustafa TEPE' ye çok teşekkür ederim. Bu tez için gerçekleştirilen laboratuvar çalışmalarının tamamında emeği ve desteği ile yanımda olan araştırma grubu arkadaşım Özkur KURAN ile birlikte diğer bütün çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, tüm yaşamım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen, karşılıksız sevginin yegâne adresi çok değerli aileme teşekkür etmeyi bile anlamsız buluyorum. Onlar olmasaydı benim için hiçbir şey olmazdı.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLolar DİZİNİ.....	xvi
1.GİRİŞ	1
2.SÜPERİLETKEN AYGIT ÜRETİM TEKNOLOJİSİ.....	5
2.1 İnce Film Büyütme	5
2.1.1 DC/RF Magnetron Püskürtme Tekniği.....	5
2.2 Litografi ve Aşındırma İşlemleri	14
2.3 Elektriksel Bağlantılar ve Çip Paketleme	19
3.ÇOK KATMANLI YBCO SÜPERİLETKEN YAPILAR.....	21
3.1 YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} / SrTiO ₃ İnce Filmleri ile Çok Katmanlı Süperiletken Yapı Üretimi	21
3.2 Çok Katmanlı YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} Süperiletken Yapısının Karakterizasyonu	25
3.3 Analiz Sonuçları ve Tartışma	27
4.ÇOK KATMANLI SÜPERİLETKEN AYGITLARIN MANYETİK KALKANLANMASI	33
4.1 Süperiletken YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} Film ve Mikro Köprülerin Üç-Katlı Yapıda Üretilmesi.....	33
4.2 Aygıt Karakterizasyonu ve Manyetik Kalkanlama Uygulaması	35
4.3 Performans ve Analizler	36
5.SONUÇLAR.....	41
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	43
ÖZGEÇMİŞ	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. İnce film püskürtme işleminin temsili gösterimi.....	6
2.2. Argon atomunun iyonlaştırılması. Kırmızı renkte gösterilen elektron, Argon atomundan kopartılıp ortamda serbest hale geçen ikincil elektronu temsil etmektedir.....	7
2.3. Magnetron püskürtücü sistemi dinamiği.	9
2.4. Hedef malzeme – substrate arasındaki mesafenin büyüme hızına etkisi ve aktif püskürtme alanı.	12
2.5. Elektriksel bağlantılar ve kapsülleme işleminden sonra elektronik teste ve kullanıma hazır süperiletken YBCO mikroköprü aygıtı.	20
3.6. Magnetron Püskürtme yöntemiyle YBCO ve STO ince filmlerin üretim diyagramları.	24
3.7. STO substrate üzerine büyütülmüş YBCO/STO/YBCO/STO/YBCO çok katmanlı yapısı ve en üstte bulunan mikroköprünün şematiği. Kenar açıklıkları elektriksel kontakların alınabilmesi ve YBCO katmanları arasında kısa devre olasılığının önüne geçilebilmesi için mekanik maske kullanılarak yapılmıştır.	25
3.8. Ac manyetik susepibilite – sıcaklık ölçüm mekanizmasının temsili şematiği..	296
3.9. Dc direnç-sıcaklık ölçümü için uygulanan 4 nokta tekniğinin şematik gösterimi.....	31
3.10. Ac manyetik suspetibilite – sıcaklık ölçümleri. Ölçümler herbir YBCO ince film üretiminin ardından yapılmıştır. Katman sayısı arttıkça geçiş sıcaklığındaki kayma açık bir şekilde görülmektedir. İç kısımda bulunan şekil ise, birinci YBCO ince filmin dirence bağlı olarak kritik sıcaklığındaki kaymaları göstermektedir.	29
3.11. Çok katmanlı yapıda bulunan her bir YBCO ince filmin dc direnç – sıcaklık karakteristikleri verilmiştir. 1. 2. Ve 3. YBCO ince filmler üretim işleminin tamamlanmasının ardından ayrı ayrı karakterize edilmiştir. İç kısımda bulunan grafik, aynı R-T eğrisini dar bir aralıkta göstermektedir.	31

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.12. 5 katlı olarak üretilmiş çok katmanlı yapının en üst katmanında bulunan 25 μm lik yol genişliğine sahip YBCO mikroköprünün DC akım-voltaj karakteristiği. 77 K de ölçülen kritik akım değeri 40 mA dir. Aynı mikroköprüler ait direnç – sıcaklık karakteristiği iç kısımda gösterilmiştir.	32
4.13. Süperiletken YBCO mikroaygıtı YBCO/STO/YBCO formasyonunda çok katmanlı bir şekilde üretilerek entegre edilmiş süperiletken YBCO ince film manyetik kalkanı.	34
4.14. YBCO ince filmlerin AC manyetik suseptibilite – sıcaklık eğrileri. ($\square$) datalar tek katmanlı YBCO ince filme ait sinyalleri, ve ($\circ$) datalar ise çok katmanlı yapıda bulunan en alt katmana ait YBCO ince filmin sinyallerini temsil etmektedir.	37
4.15. Tek kat ve çok katmanlı YBCO mikroköprülerin dc direnç – sıcaklık grafikleri.	38
4.16. Farklı büyüklüklerde manyetik alan uygulanmış a) tek katlı, b) çok katlı YBCO mikroköprülere ait akım-voltaj karakteristikleri.	40
4.17. Kalkanlanmış ve kalkanlanmamış YBCO mikroköprülerin kritik akımlarının uygulanan manyetik akım altında gösterdiği değişimler.	41

TABLolar DİZİNİTabloSayfa

3.1. Magnetron Püskürtme sistemi için YBCO ve STO ince film üretim parametreleri.....	23
---	----

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
χ	Manyetik suseptibilite
T	Sıcaklık
mT	miliTesla
Ar	Argon
Ar^+	Argon iyonu
I	Akım
V	Voltaj
K	Kelvin
R	Direnç
μm	mikrometre
MA	Mega-amper
Ω	Ohm
mbar	milibar
Au	Altın

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
YBCO	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$
STO	SrTiO_3
DC	Doğru akım
AC	Alternatif akım
RF	Radyo frekansı
UV	Morötesi ışınım/Ultraviyole
SQUIDs	Süperiletken kuantum girişim aygıtları

1. GİRİŞ

Süperiletken ince filmler, süperiletken kuantum girişim aygıtları (SQUIDS) gibi küçük boyutlu süperiletken aygıt elektroniğinde ve daha birçok farklı süperiletkenlik uygulamalarında kullanılmak üzere üretilirler (Balashov et al., 1999). Bu uygulamalar, Niobium (Nb) gibi düşük sıcaklık süperiletkenleri kullanılarak geliştirilen aygıtlar için kalitesini ve güvenilirliğini yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlarla kanıtlamıştır (Balashov et al., 1999; Andrianov et al., 2006). Fakat benzer nitelikteki süperiletken yapılar ve uygulamalar YBCO gibi yüksek sıcaklık süperiletkenleriyle çok katmanlı şekilde şimdiye kadar aynı standartlarda üretilmemiştir. Bunun önemli nedenlerinden birisi YBCO ince filmlerin ve bu filmler için uygun tampon tabakaların kristal yapıda üretilmesi için gerekli olan yüksek sıcaklık işlemlerdir (Jiang et al., 1993). Süperiletken çok katmanlı YBCO ince filmler üretilirken kullanılan ara katmanlar ve YBCO katmanları birbiri ardına büyütülürken, alt katmanların maruz kaldığı yüksek sıcaklık işlemleri, bu filmlerin elektriksel ve yapısal bir takım özelliklerinde önemli ölçüde bozulma meydana getirir. Ayrıca bu yapılarda bulunan katmanların desenlenmesi için uygulanacak fotolitografi ve aşındırma işlemleri esnasında, filmler zarar görebilmektedir. Bozulmaya uğrayan filmlerin üzerine büyüyecek bir sonraki katman da o filmin kristal yönelimi doğrultusunda büyümeye devam edeceği için, sonuç olarak elde edilen çok katmanlı yapının yeterli kalitede olmayacağı söylenebilir (Brunch et al., 1997; Pettiette-Hall et al., 1997; Daly et al., 1995; Cassel et al., 2003). Şimdiye kadar, YBCO ince filmler kullanılarak büyütülen çok katmanlı yapılarda karşılaşılan problemler ele alınarak tekrarlanabilir bir üretim metodu geliştirmek özellikle aygıt kalitesinde çok katmanlı süperiletken YBCO yapılarının üretimi için büyük önem taşımaktadır. Son 10-20 yıllık süreçte, Josephson eklem tabanlı aygıtlar (Soutome et al., 2003; Pettiette-Hall et al., 1999), süperiletken filtreler (Chen et al., 2001; Oates et al., 1999) ve akı dönüştürücüler (Faley et al., 2006) gibi küçük boyutlu elektronik aygıtların YBCO ince filmler kullanılarak çok katmanlı yapıda üretilmesi için birçok girişimde bulunulmuştur. Ayrıca, bazı uygulamalarda, tek katmanlı YBCO ince filmler; SrTiO_3 , CeO_2 , YSZ ($\text{Y}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$) ve CeO_2/YSZ , gibi ara katmanlar üzerine büyütülerek, altlık ile

en üst ince film arasındaki kristalleşme yapısını iyileştirmek ve iki yüzey arasındaki kusurları minimuma indirmek amaçlanmıştır (Tian et al., 1998; Mechin et al., 1999; Migliuolo et al., 1989; Boffa et al., 1996). Bu çalışmaların dışında, çok katmanlı üretim işlemleri sürecinde her bir katmanın karakteristik özelliklerindeki bozulmalar da en önemli problem olarak rapor edilmiştir (Hwang et al., 2000; Karmanenkot et al., 1994).

Bu çalışmada STO altlıklar üzerine YBCO/STO/YBCO/STO/YBCO şeklindeki çok katmanlı süperiletken ince filmlerin üretimi amaçlanmıştır. STO/YBCO tabanlı çok katmanlı yapılar in-situ büyütme yöntemiyle üretim parametreleri çok hassas bir şekilde optimize edilerek dc/rf magnetron püskürtme tekniğiyle büyütülmüştür. Her bir YBCO katmanının süperiletkenlik özellikleri analiz edildikten sonra, en üst YBCO katmanı standart fotolitografi ve kimyasal aşındırma işlemleri uygulanarak mikro köprüler şeklinde desenlenmiş ve bu yapıya ait aygıt performansı test edilmiştir.

Üretilen çok katmanlı süperiletken YBCO ince film yapısına ait kritik sıcaklık ve kritik akım yoğunluğu gibi önemli süperiletkenlik parametrelerinde tatmin edici değerler gözlemlenmesi üzerine, bir başka çok katmanlı süperiletken YBCO ince film yapısı tasarlanmış ve bu yapı farklı bir süperiletkenlik uygulamasında kullanılmıştır.

Öyle ki, süperiletken aygıtlarda bilinen en temel karakteristik özelliklerden birisi, Josephson eklemleri ve süperiletken hatların kritik akım değerlerinin manyetik alana olan bağımlılığıdır (Afonso et al., 1996). Bu türdeki aygıtların kritik akım değerleri dışardan uygulanan manyetik alanlara (dünyanın manyetik alanı) çok duyarlı olduğu için, aygıtların sinyal kalitesini arttırmak ve manyetik alandan kaynaklanan gürültü sinyallerinin etkisini minimize etmek için manyetik kalkanlama (manyetik alandan koruma) işlemi aygıtlar çalıştırılırken uygulanması zorunludur (Jang et al., 2009; Bick et al., 2001). Bu tip dış etkilere en bilinen kaynaklar, dünyanın manyetik alanı, güç hatları ve elektronik ekipmanlar gösterilebilir ki bu kaynaklardan salgılanan gürültü sinyalleri, özellikle süperiletken aygıtların performansı sırasında ortadan kaldırılmalıdır (Bick et al., 2001; Katsuno et al., 2003). Çoğunlukla bu

gibi aygıtlar kullanılırken dış manyetik alanlar μ -metal kafesler kullanılarak sıfırlanmış böylelikle bu kafesler süperiletken sistemlerin temel bir parçası haline almıştır (Katsuno et al., 2003; Gudoshnikov et al., 1998; Avcı et al., 2009). Fakat bu tip manyetik kalkanlama “odaları” tahribatsız ölçüm sistemleri (NDE) gibi taşınabilir ölçüm sistemleri için birçok uygulamada kullanışsız bir durum olarak ortaya çıkmaktadır (Nie et al., 1997; Seidel et al., 2007). Başka bir durum da μ -metal kalkanlama kullanılması test yapılacak bölgeyi sınırlandırarak, sistemlerin ölçüm kapasitesini azaltmaktadır (Seidel et al., 2007). Kendiliğinden manyetik olarak korunan mekanizmalara sahip aygıtlar bu türden kısıtlamaların üstesinden gelebilmektedir. Örnek olarak, Nb tabanlı düşük sıcaklık süperiletken aygıtlara entegre edilmiş dengeleme bobinleri aygıtların manyetik alandan korunabilme performanslarını önemli miktarda arttırmaktadır (Brake et al., 1991). Nb tabanlı aygıtlar için çok katmanlı yapıların üretimi başarılı bir şekilde geliştirilebilmesinden dolayı (Kim et al., 2007; Wikswo et al., 1995; Panaitov et al., 2002), bu tipten bir kendiliğinden manyetik korunma mekanizması kolay bir şekilde uygulanabilir (Koch et al., 2001). Fakat çok katmanlı yapılarla yapılan işlemlerin YBCO gibi yüksek sıcaklık süperiletkenlerine uygulanmasında karşılaşılan kısıtlamalar ve temel problemler sebebiyle, bu türden kendiliğinden korunmalı bir mekanizma YBCO tabanlı süperiletken yapılar için şimdiye kadar geliştirilememiştir (Zotev et al., 2008; Clarke et al., 2004). Çözümlerden bir tanesi olarak YBCO SQUID lerin gradyometrik şekilde kullanılması olarak düşünülmüştür (Bar et al., 1996). Bir diğer taraftan da, dengeleme bobininin süperiletken YBCO aygıt üzerine tümleşik şekilde entegrasyonunu sağlayabilmek için birçok girişimde bulunulmuştur (Drung et al., 2003; Hatsukade et al., 2005). Fakat bu işlemlerin çoğunda karmaşık fabrikasyon işlemleri gereklidir ve bu aygıtların performansları yeterli ölçüde değildir. Bir başka çözüm olarak süperiletken YBCO ince filmlerin diyamanyetik özelliğinden faydalanılarak, YBCO ince filmin kendisinin bir manyetik kalkan olarak kullanılmasıdır (Terauchi et al., 2011). Bu durumda, süperiletken aygıttan bağımsız bir süperiletken YBCO ince film, aygıt arkasına yerleştirilip yapıştırılarak entegrasyon sağlanır. Böylelikle çok katmanlı bir yapı üretimi için gerekli olan karmaşık fabrikasyon işlemleri ortadan kalkmış olur ve ince film ve aygıtların süperiletkenlik özellikleri korunarak yüksek performansta çalışmaları sağlanır (Hatsukade et

al., 2009). Bu türden bir tasarım da dış manyetik alanları önemli ölçüde elemine edebilse de, süperiletken ince film ve süperiletken aygıtın ikisinin birden tek bir altlık üzerine çok katmanlı yapıda büyütülmesi aygıt uygulamaları için iki ayrı süperiletken örnek kullanılmasından çok daha pratik bir uygulamadır. Bu sebeple, çok katmanlı yapılarda süperiletken aygıt fabrikasyonunda kendi kendini dış sinyallerden koruyabilen mekanizmaların geliştirilmesi önemli bir uygulama olarak değerlendirilmelidir.

Bu amaçla, manyetik kalkan katmanı süperiletken aygıtta YBCO-kalkan/STO/YBCO-mikroaygıt formasyonunda entegre edilebilmesi için çok katmanlı bir fabrikasyon işlemi bu tez çalışmasının ikinci kısmı olarak geliştirilmiştir. Herbir süperiletken katmanın elektriksel özellikleri birbirinden bağımsız bir şekilde üretim işlemi parametrelerine bağlı olarak karakterize edilmiştir. En alt YBCO katmanına ait manyetik koruma performansı, YBCO mikro aygıt üzerine uygulanan farklı büyüklüklerdeki dış manyetik alanlar altında I-V ölçümleriyle test edilmiştir.

2. SÜPERİLETKEN AYGIT ÜRETİM TEKNOLOJİSİ

Küçük boyutlu elektronik aygıtlar, sahip oldukları üretim teknolojisi dolayısı ile ince film aygıtlar olarak da adlandırılırlar. Bunun sebebi, birkaç nanometrelik ince filmler üzerine uygulanan standartlaşmış desenleme (litografi ve aşındırma) işlemleri ile birçok elektronik cihazın üretilebilmesidir. İnce film aygıt üretimi genel başlığı altında, üç-önemli adımı izlemek elektronik bir aygıtın test edilip kullanılabilir hale gelmesi için yeterlidir;

- 1) İnce film büyütme
- 2) İnce film desenleme (litografi ve aşındırma)
- 3) Elektronik bağlantılar ve çip paketleme

2.1. İnce Film Büyütme

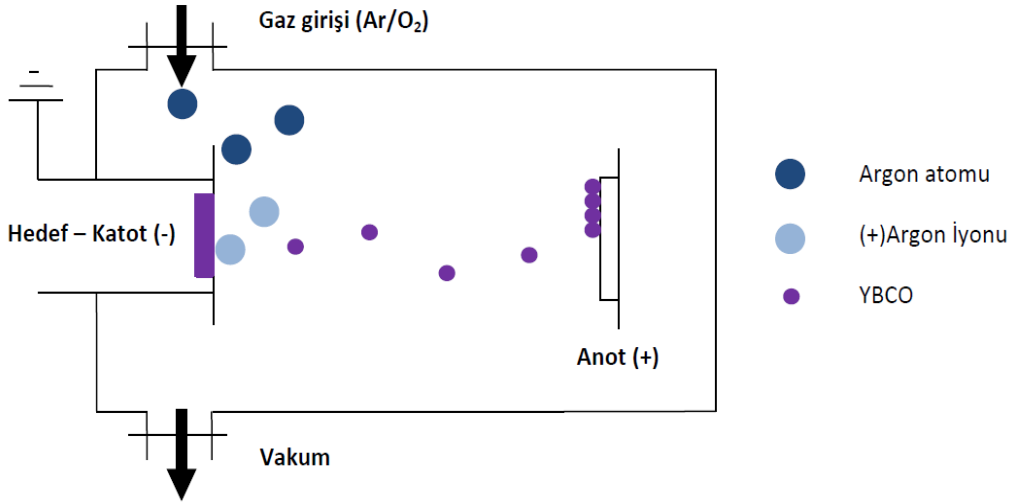
2.1.1. DC/RF Magnetron Püskürtme Tekniği

İnce film büyütme işlemi birçok elektronik uygulamada kullanılan ve birkaç nm' den mikron kalınlıklarda filmlerin kontrollü olarak üretilmesine olanak sağlayan önemli bir uygulamadır. İsminde yer alan “büyütme” (growth) sözcüğü elde edilen yapının üretim tekniğini sınıflandırmaktadır. İnce filmler birçok farklı yöntemle üretilmektedir. Bunlardan bazıları termal buharlaştırma, spin kaplama ve bu tez çalışmasında ve tüm küçük boyutlu elektronik aygıt uygulamalarında kullanılan atomik boyutta epitaksiyel büyütme işlemidir. Termal buharlaştırma ve spin kaplama işlemlerinde, ince film olarak elde edilecek malzeme bir bütün halinde kaplama yapılacak yüzeye doğru rastgele ve karmaşık bir yapı halinde kaplanırken, ince film büyütme işleminde bu gelişim tamamiyle farklıdır. Malzemeler hedef üzerinden atomik boyutta gerçekleşen fiziksel etkileşimler sonrasında koparılır ve enerji transferiyle hareketlenen hedef malzeme atomları altlık üzerine atomik boyutta katman katman büyür.

Bu tez çalışmasında kullanılan ve bu bölümde detaylı olarak inceleyeceğimiz magnetron püskürtme (sputtering) işleminin dışında, darbeli lazer biriktirme (PLD), moleküler ışın epitaksisi (MBE) gibi yaygın olarak

kullanılan ve en az magnetron püskürtme tekniği kadar homojen ve elektronik uygulamalarda kullanılabilir kalitede filmler elde etme yöntemleri de mevcuttur.

Püskürterek ince film büyütme tekniği temel olarak, farklı kutuplanmış iki elektrot arasına gönderilen inert (kararlı) bir gazın (soygaz, genellikle Argon) pozitif iyon haline dönüştürülmesi sonrasında, katotta (negatif elektrot) bulunan hedef malzemeye doğru hızlandırılıp bu malzeme üzerine çarpmasıyla malzemeden parçacıkların koparılması ve bu koparılan parçacıkların da hedefin tam karşısına yerleştirilmiş olan altlık üzerine teker teker yerleşerek büyümesidir (şekil 1).

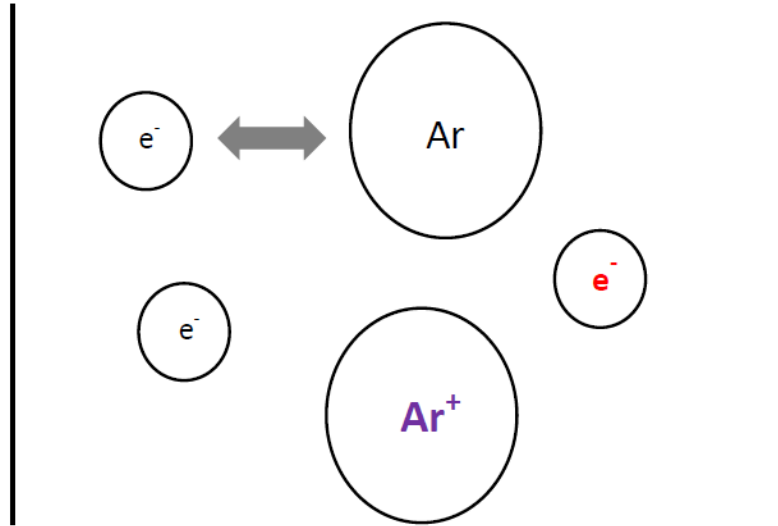


Şekil 1. İnce film püskürtme işleminin temsili gösterimi.

Yukarıdaki temsili şekilde gösterilen püskürtme işleminde incelenmesi gereken nokta vakum ortamına gönderilen kararlı Argon gazlarının nasıl iyonlaştırıldığı ve iyonlaşan gazların vakum ortamında elektron iyon dengesinin nasıl sağlandığıdır. Bunun akabinde, iyonların hedef malzeme üzerine nasıl yönlendiği ve ne tür fiziksel etkileşimlerle hedef malzemeden atomların koparıldığı da detaylı olarak ele alınmalıdır.

Vakum ortamında kararlı halde bulunan Argon gazları üzerine dışarıdan etki yapabilmek mümkün değildir. Bir soygazı iyonlaştırmak için yapılacak tek şey bir elektronunu koparmaktır. Böylelikle soygaz bir iyonla dönüşecek ve

elektromanyetik ortamda hareketlenebilecektir. Bu tür bir püskürtme sisteminde dışarıdan yapılabilen müdahale sadece iki elektrot arasında uygulanan elektrik alan değerini arttırmaktır ki bu elektrik alan değeri de ne kadar artarsa artsın kararlı halde bulunan Argondan bir elektron koparamaz ve onu iyon haline dönüştüremez. Gerçekleşmesi en mümkün olay, katot olarak kullanılan iletkenliği yüksek malzemenin (genellikle Cu) ortama kolayca elektron salınımı yapabilmesi ve bu elektronların Argon gazlarıyla çarpışması ve Ar^+ iyonlarının oluşmasıdır. İletkenliği yüksek malzeme atomlarının en dış yörüngesinde bulunan bir elektronun serbest hale gelmesi ve sistem içerisinde bulunan soygaz ile çarpışması Ar^+ iyonlarının oluşabilmesi için yeterlidir.



Şekil 2. Argon atmonun iyonlaştırılması. Kırmızı renkte gösterilen elektron, Argon atomundan kopartılıp ortamda serbest hale geçen ikincil elektronu temsil etmektedir.

Şekil 2’de gösterildiği gibi, bir elektronun bir Argon atomuyla çarpışması Ar^+ iyonunu oluştururken, ortama da fazladan bir elektron daha aktarılmasını sağlar. Bu şekilde ortamda artan serbest elektron sayısı, diğer Argon atomlarının iyonlaştırılmasını yardımcı olur ve püskürtmeyi sağlayan plazmanın yoğunluğunu artırarak püskürtme ve ince film büyüme verimini artırır.

Yukarıda belirttiğimiz işlemlerle oluşan Ar^+ iyonları hedef malzemeyi püskürten temel parçacıktır. Peki, bu işlem nasıl gerçekleşir onu inceleyelim.

Katı yapıda bulunan bir hedef malzemenin, daha küçük boyutta tanecikler halinde koparılması için belirli bir enerji ile etkileşmeye girmeli ve o taneciklerin malzemeden koparılması gerekmektedir. Sputtering tekniği ile ince film kaplama işlemi de tam olarak buna benzetilebilir. Bir bilyenin duvara fırlatılması sonucunda duvar ile bilye arasında gerçekleşen fiziksel etkileşimler ile kırılan duvardan kopan parçalar da yerçekimi etkisiyle aşağıya doğru düşecektir. Bu benzetmede belirtilmesi gereken önemli bir durum, elektromanyetik etkileşimlerin geçerli olduğu bir ortamda yerçekimi etkilerinin geçerli olmadığıdır. Yani, vakum ortamında gerçekleşen püskürtme işleminde açığa çıkan parçacıkların yönlenmesi ve bir noktada birikmesinde yerçekiminin herhangi bir etkisi yoktur.

Duvara fırlatılan bilyeyi Ar^+ iyonu olarak düşünersek, farklı kutuplanmış iki elektrot arasındaki elektrik alan etkisi altındaki pozitif iyonlar, iki elektrot arasına uygulanan potansiyel farkın arttırılmasıyla negatif elektrota doğru hızlanırlar. Hızlanan parçacıklar ise bir kinetik enerji kazanır. Aşağıda verilen denklemler bu ifadeyi fiziksel olarak açıklamaktadır.

$$\vec{F} = m\vec{a} = q\vec{E}, \quad \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

$$E = \frac{V}{d}$$

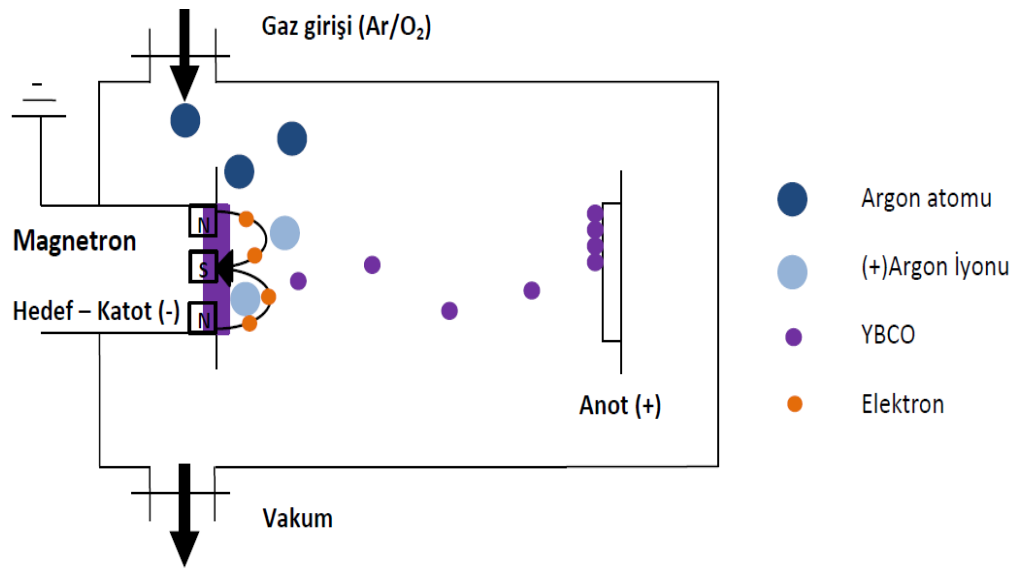
$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q \frac{V}{d}$$

$$\vec{v} \sim V, \quad E = \frac{1}{2}mv^2.$$

Sahip oldukları enerjiyle hedef malzemeyle doğrusal olarak çarpışan pozitif argon iyonları, aynı bir bilyenin duvara fırlatılmasında yarattığı etki

gibi, hedef malzemeden parçacık koparır ve bu kopan parçacıklar püskürtmeye başlar.

Püskürtme (sputtering) tekniği isminin başında bulunan magnetron ve manyetik alan kavramı ise oluşan plazmanın dinamiğini kontrol etmek için bu üretim tekniğine daha sonradan yerleştirilmiştir. Öyle ki, hem argon gazını iyonlaştırmak için bulunan serbest elektronlar hem de iyonlaştırma işlemi sonucunda açığa çıkan ikincil elektronlar negatif yüklü olduğu için Ar^+ iyonlarının aksine pozitif elektrotta bulunan ince film büyümeye başlamış altlık üzerine doğru yönelirler. Bu yönelim film büyüme işlemini negatif yönde etkiler. Çünkü nasıl ki Ar^+ iyonları hedef malzemeyi aşındırıp oradan malzeme koparıyorsa, aynı etkide olmamasına rağmen bir miktar büyüyen film elektronlar tarafından zarar görüp koparılır. Bu olaya re-sputtering denir. Bunun önüne geçmenin yolu olarak ise manyetik alan kullanılmıştır. Katot ve hedef malzeme üzerine yerleştirilen magnetronun meydana getirdiği manyetik alan serbest halde bulunan elektronları kendi üzerine hapsederek elektronları pozitif elektroda doğru yönelmesini veya kaçmasını engeller. Aynı şekilde Ar atomlarıyla daha yakın temasta bulunmasını sağlayarak hem iyon-elektron-atom üçleme dengesini kurar hem de Ar^+ iyon miktarının arttırılmasına büyük ölçüde katkı sağlar. Magnetron sputtering ve diğer plazma yapıda ince film üretimi gerçekleştiren tekniklerin tamamına hakim olan plazma dinamiği başlı başına irdelenmesi gereken önemli bir kavramdır.



Şekil 3. Magnetron püskürtücü sistemi dinamiği.

Yukarıda bahsettiğimiz püskürtme tekniği DC magnetron püskürtme tekniği olarak bilinmekte ve çalıştırmak için doğru akım güç kaynakları kullanılmaktadır. Bunun dışında yaygın olarak kullanılan bir diğer metod ise RF magnetron püskürtme tekniğidir. İletken malzemelerden ziyade daha çok yalıtkan hedeflerin ince filme dönüştürülmesi işlemlerinde tercih edilir.

Doğru akım (DC) püskürtme tekniğine benzer olarak, RF tekniğinde de Argon gazı iyonlaştırılıp hedefe doğru hızlandırılır ancak farklı olarak DC sistemlerde atom iyonlaştırma işlemi için gaz atomları elektronlar ile direk olarak bombardman edilirken, RF sistemlerinde Argon gazını iyonlaştıran RF kaynağından yayınlanan enerjidir. RF püskürtmenin DC püskürtmeden ayrılan temel özellikleri kullanılan voltaj miktarı, sistem basıncı, püskürtme deseni ve de hedef malzemenin cinsidir.

RF püskürtme işleminde doğru elektron akımı yerine radyo dalgaları kullanılması sebebiyle, püskürtücü sisteminde farklı etkileri ve gereklilikleri olur. Örneğin, DC sistemleri 200 ve 500 volt arasında gerilime ihtiyaç duyarken, RF sistemlerinde aynı büyüme oranını elde edebilmek için ihtiyaç duyulan gerilim çok daha yüksektir. Bunun sebebi de kararlı gazı iyonlaştırmak için DC sistemlerde direk elektron bombardmanı gerçekleşirken, RF sistemlerinin enerji kullanmasıdır (radyo dalgası). Elektron akımıyla aynı etkiye sahip radyo dalgalarının oluşması için RF sistemleri çok daha büyük enerjiye ihtiyaç duyar. DC püskürtme sistemlerindeki en önemli problem olarak hedef malzeme üzerindeki yük birikmesidir. Yüzey üzerinden uzaklaştırılamayan elektron hedef malzemeyi aşındırarak ciddi anlamda zarar verir. RF kaynaklı püskürtücülerin ortaya çıkmasının sebebi de bu probleme çözüm üretmek olarak düşünülebilir. Çünkü AC akım mantığı ile çalışan RF sistemlerinde, belirli frekans (yaklaşık MHz mertebelerinde) aralığında elektrotların yük değiştirmesi hedef malzemede elektron birikmesini ortadan kaldırmaktadır. Bununla birlikte RF sistemlerinde karşılaşılan önemli problem ise aşırı ısınmadır.

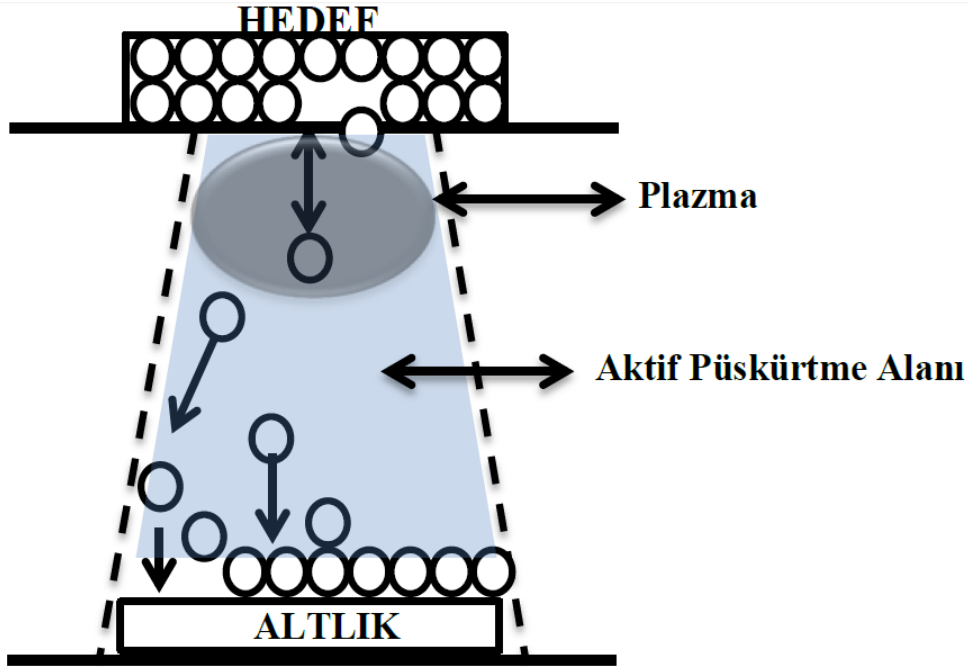
RF sistemlerde plazma DC sistemlere göre çok daha düşük gaz basınçlarıyla elde edilebilir. Bu tez çalışmasında da göreceğiniz üzere, DC püskürtme tekniği RF tekniğine göre 10 kat daha yüksek gaz basıncı

gerektirmiştir. Bu durum RF sistemleri için bir avantaj oluşturmaktadır. Düşük gaz basıncı sayesinde hedef malzeme parçacıkları ile gaz iyonları arasında daha az çarpışma meydana gelir ve parçacıkların substrate üzerine çok daha direkt bir yol üzerinden hareketlenmesi sağlanır. Düşük gaz basıncı kullanımının doğru akım kaynakları yerine radyo dalga kaynaklarının kullanılmasıyla birleştirilmesi, yalıtkan özelliklere sahip hedef malzeme kullanılacak sistemler için RF püskürtme tekniğini ideal bir pozisyona getirmektedir.

DC/RF magnetron püskürtme tekniği, birçok üretim parametresine sahip olması üretim işlemini karmaşıklştırıyor gibi gözükse de, yüksek kaliteye sahip homojen filmlerin üretilebilmesi hemen hemen bilinen bütün hedef malzemeler için magnetron püskürtme tekniğini önemli bir pozisyona taşımaktadır.

Uygulanan DC/RF güç, anot ve katot arasındaki voltaj farkı ve mesafe, substrate sıcaklığı, hedef malzeme ile substrate arasındaki mesafe, oksijen ve argon kısmi basınçları, substrate ısınma ve soğuma süreleri gibi parametreler magnetron püskürtme tekniği için kullanılır. Bu parametreler arasında farklı gruplar üretilen filmlerin farklı özelliklerini belirlerler. Argon kısmi basıncı, hedef malzeme ve substrate arasındaki mesafe, uygulanan DC/RF güç ve anot katot arasındaki voltaj farkı ince filmin büyüme oranını (hız) belirlemektedir. Uygulanan yüksek voltaj farkından kaynaklı yüksek güç, daha yüksek enerjili iyonların hedef malzemeye çarpmasını ve daha çok parçacığın koparak substrate üzerinde birikmesini sağlarken bu yüksek güçten kaynaklı yüksek parçacık miktarı plazma dinamiğine olumsuz etkilerde bulunmaktadır. Belirli bir alanda bulunan farklı türden çok sayıda farklı parçacık, istenmeyen çarpışmaların oluşmasına ve dolayısıyla parçacıkların yönedikleri doğrultudan sapıp farklı noktalara hareket etmelerine sebep olur. Bu nedenle de substrate üzerindeki ince film büyüme oranında beklenen artış, uygulanan yüksek güç sebebiyle azalmaya uğrayabilir. Bu durumda yapılması gereken, uygulanan güç miktarının artmasıyla birlikte içerideki iyonlaştırılacak kararlı gaz kısmi basıncını azaltmaktır. Bu sayede daha yüksek enerjili parçacıklar elde edilmesiyle birlikte plazma ortamında bulunan parçacık sayısının azalması, istenmeyen çarpışma sayısını azaltacak ve ince film büyüme oranında beklenen artışın elde edilmesini sağlayacaktır. Bu gibi problemlerin ortadan

kaldırılabilirliği için parametreler kesinlikle çok hassas bir şekilde optimize edilmelidir. Büyüme oranını arttırmak için gücün artırılmasının bir başka negatif sonucu, hedef malzemeye vereceği zarardır. Daha yüksek enerjiye sahip iyonlar çok daha yüksek hızlara sahip olacağı için daha yüksek momentum ve daha yüksek enerjiyle hedef malzemeye doğru hareketleneceklerdir. Çarpışma anında meydana gelen enerji transferinde hedef malzeme üzerinde ciddi anlamda ısınma ve aşınma meydana gelebilmektedir. Bu da hedef malzemenin çatlamasına kırılmasına ve daha sonraki uygulamalar için elverişsiz bir hal almasına sebep olmaktadır. Bu sebeplerden ötürü, ince film büyütme hızını arttırmak için başvurulması gereken en kolay ve etkin yöntemin, hedef malzeme ile substrate arasındaki mesafenin azaltılması olduğunu söyleyebiliriz. Mesafenin azalması, ince filmin büyüyeceği altlığın daha fazla aktif püskürtme alanı içerisine girmesi anlamına geldiğinden, hedef malzeme üzerinden püsküren parçacıkların çok daha büyük kısmı altlık üzerinde tutunacaklardır. Ayrıca, mesafenin uzak olması, püsküren parçaların katettikleri mesafeyle birlikte altlık üzerine tutunmak için ihtiyaç duydukları enerjilerini kaybetmelerine sebep olmaktadır.



Şekil 4. Hedef malzeme – altlık arasındaki mesafenin büyüme hızına etkisi ve aktif püskürtme alanı.

İnce film büyüme işlemi sırasında kullanılan altlık sıcaklığı, “çoğunlukla” elde edilmek istenilen filmin kristalleşebilmesi için gereklidir. Her malzemeden elde edilen filmlerin çoklu-kristal veya tek kristal yapılarda üretilmesi için farklı üretim sıcaklıkları gereklidir. YBCO ve STO gibi malzemeler oda sıcaklığında üretildiğinde amorf yapıda elde edilirken bu malzemelerin 600 °C sıcaklıklarının üzerinde büyütülmesi belirli doğrultularda kristalleşmenin başlamasını sağlamaktadır. YBCO 600 °C sıcaklığından itibaren a-b eksenlerinde çoklu-kristal bir yapıda oluşmaya başlamaktadır. Ancak 720-750 °C sıcaklıklarından itibaren çoğunlukla c-eksenli yönelime sahip tek kristal ince filmler elde edilmektedir. Aygıt kalitesinde YBCO ince filmler üretebilmek için filmlerin c-eksenli yönelime sahip tek kristal olması gerekmektedir.

Bir diğer parametre olan oksijen kısmi basıncı ve oksijenleme ise, yalnızca oksijenli yapıya sahip malzemelerin üretimi için büyük önem taşır (YBCO, STO, ZnO, CeO₂) . Niobium (Nb) ve MgB₂ gibi oksijene çok duyarlı ancak yapısında oksijen barındırmayan malzemelerle ince film büyütme istenildiğinde ise sistemin tamamından oksijeni uzak tutmak gerekmektedir. Bu gibi işlemler için üretim yapılacak sistemin vakum seviyesinin 10⁻⁹ mbar mertebelerine kadar düşürmek gerekmektedir. Bu tez çalışmasında da üretimini gerçekleştirdiğimiz YBCO ve STO gibi malzemelerde oksijen miktarını ayarlamak büyük bir önem kazanmıştır. Öyle ki YBCO ‘ ya ait oksijen 7 atom miktarının altında kaldıkça malzemenin kristal yapısı bozulur ve orthorombik kristal yapısından kaynaklı süperiletken özellikleri oksijen miktarı 6 atom seviyelerine inildikçe tetragonal kristal yapısına dönüşüp yarı-iletken bir malzeme özelliğine dönüşmektedir. Aynı şekilde bu çalışmada yalıtkan özellikleri sebebiyle kullandığımız STO malzemesinin 3 adet oksijen atomu bulunmaktadır. Ancak bu sayı azaldıkça, malzeme iletken bir hale geçmeye başlar. Bu ve buna benzer sebeplerden ötürü, ince film büyütme ve üretim işlemlerinde oksijenleme işlemi ve oksijen miktarının optimize edilmesi bir diğer önemli husustur.

Bir diğer önemli işlem ise altlık sıcaklığının azaltılmasıdır. Yukarıda bahsettiğimiz gibi, filmlerin yüksek sıcaklık altında üretilmesinin sebebi kristalleşmelerine gereksinim duyulmasıdır. Fakat film üretiminin sona

ermesinin ardından sistemi çok hızlı bir şekilde soğutmak film yüzeyinde genleşme ve daralmalara sebep olacak ve filmleri çatlatacaktır. Bu sebeple belirli bir soğuma oranı belirlenmeli ve bu orana göre filmler oda sıcaklığına kadar soğutulmalıdır.

Yukarıda bahsedilen magnetron püskürtme tekniği için kullanılan işlem parametreleri, üretilmek istenilen farklı türde malzemeler için farklı değerler olacaktır. Farklı malzemelerin farklı formlarını elde edebilmek için de yine üretim parametrelerini baştan aşağıya optimize etmek gerekecek, bir parametrenin azaltılması tüm diğer parametreleri de etkileyebilecektir. Bu sebeple ince film olarak üretilmesi istenilen malzemenin yapısı ve formu iyice irdelenmeli, üretim parametreleri ona göre teker teker çok hassas bir şekilde optimize edilmeli ve bu parametreler kullanılarak tekrar tekrar üretilen filmlerin hemen hemen hepsinin birbirine çok yakın özelliklere sahip olduğu gözlenmelidir. Bu şekilde üretilecek filmler, yüksek kalitede, tekrar üretilebilir ve güvenilir olacaktır.

2.2. Litografi ve Aşındırma İşlemleri

Elektronik aygıt üretiminde ince filmler litografi ve aşındırma işlemlerine maruz bırakılarak belirli genişlik ve şekillerde desenlenirler. Bu işlemler hemen hemen bütün elektronik aygıtların üretiminde uygulanır ve çip üretimi gerçekleştirilir. Bilinen çok küçük ve neredeyse gözle ayırt edemeyeceğimiz şekilde üretilmiş dedektörler, sensörler ve entegre devre elemanları da bu işlemler uygulanarak elde edilir.

Bir ince filmi desenleme işlemi izlenecek adımlar açısından standart bir işlem olarak gözüke de her bir adımın özelliklerinden kaynaklı olarak farklı teknikler ve sistemler kullanılmaktadır. İstenilen bir altlık üzerine belirli bir kalınlıkta ince film büyütüldükten sonraki adım olarak ince film desenleme işlemleri aşağıda açıklanmıştır;

1. İnce film büyütme



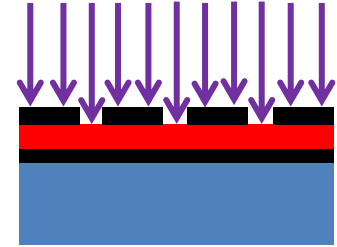
2. Fotoresist kaplama



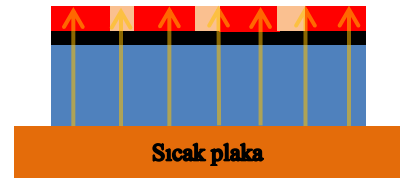
3. Hafif tavlama



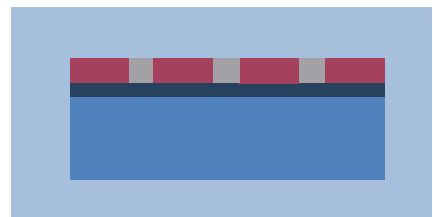
4. Maske hizalama ve UV işlemleri



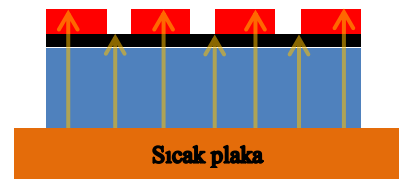
5. Ön tavlama



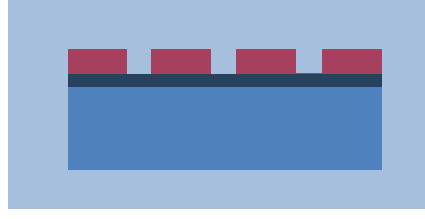
6. Develop işlemi



7. Son tavlama



8. Aşındırma



9. Durulama ve kurulama



- 1) **Fotorezist kaplama:** İnce film desenleme işleminde, filmin bir kısmı aşındırılarak tamamen ortadan kaldırılırken, bir kısmı ise korunur. Film üzerindeki bu bölgelerin iyonik veya kimyasal aşındırma işlemlerinden korunmasını sağlamak için üzerlerinin bir maskeyle korunması gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan malzemelere fotorezist denir. UV ışığa duyarlı olan fotorezist malzemesi, spin coater sistemi kullanılarak ince filmin üzerine kaplanır ve hafif-tavlama (soft-baking) işlemine tabii tutularak ince film olarak kaplanan fotorezistin filmi koruyabilecek ölçüde yapışması sağlanır. Spin-coater sistemi kullanılırken dikkat edilmesi gereken birkaç önemli nokta vardır. İlk olarak fotorezist mümkün olduğunca atmosfer ve beyaz ışık gibi çevresel faktörlerden uzak tutulmalıdır. Hava ile teması mümkün olduğunca önlenmeli ve sadece sarı ışık altında kullanılmalıdır. Aksi takdirde kısa sürede malzemenin tamamının özelliğini yitirmesine sebep olunabilir. Fotorezist malzemesi tek bir hamlede kaplama yapılacak yüzeye dökülmeli ve beklenmeden spinning işlemi başlatılıp herhangi bir noktaya kalıcı bir yapışma sağlanmaksızın fotorezistin filmin tamamına mümkün olan en homojen halde kaplanması sağlanmalıdır. Bu ince film kaplama işlemi dönerek kaplama olduğu için, yüzeyin düz olmasına dikkat edilmelidir. Eğimli bir yüzeye dönerek kaplama işleminde, filmin bir kısmı daha kalın diğer kısmı

ise daha ince olacaktır ki bu durum tercih edilmemektedir. Fotorezistin kaplama süresi ve spin-coater' ın dönme hızı farklı modellerdeki fotorezistler için farklı değerler almaktadır. Bu sebeple kaplama parametrelerinin optimize edilmesi, kullanılan malzemenin modeline göre belirlenmelidir.

2) **Hafif tavlama ve UV işlemi:** Fotorezist kaplama işleminden sonra, yumuşak pişirme işlemi uygulanır ve rezistin film yüzeyine iyice tutunması sağlanır. Bu işlem için belirlenen sıcaklık 90 °C ve süre ise 45-60 saniye dir. Belirlenen sıcaklık değeri, fotorezist kimyasalının içerisinde bulunan ve film yüzeyine yapışmayı engelleyen solventin uçmasını sağlamaktır. Sıcaklığın artırılması ve sürenin uzatılması bir sonraki adım olan develop işlemlerinde istenmeyen etkiler yaratabilir. Hafif tavlama ardından maskeleme işlemine geçilir. Desenlenmesi planlanan şekil, maske halinde hazırlandıktan sonra maske hizalama sistemi kullanılarak, ince film üzerinde istenilen bölgeye maske yerleştirilir. Bu şekilde UV lamba kaynağının tam altına getirilen film, belirli bir süre (15-30 saniye) UV kaynağına maruz bırakılır. Işık uygulanma süresi ve şiddeti desenleme kalite ve karakteristiğini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Bu sebeple, UV exposure işlemi için ek bir optimizasyon yapılması gerekmektedir. Bu şekilde yapılan litografi (desenleme) işlemlerine fotolitografi denir. Fotolitografi işleminde çözünürlük 1 µm mertebelerindedir. Sub-mikron çözünürlükte desenleme işlemleri için e-beam litografi gibi daha farklı ve hassas teknikler kullanılmaktadır.

3) **Develop işlemi:** Fotorezist; isminden de anlaşılacağı üzere, belirli dalga boyları aralığındaki fotonlara duyarlı (dirençli veya resistive) bir kimyasaldır. Bu bağlamda, fotorezistin üzerine yerleştirdiğimiz maske sayesinde, UV ışınları sadece maskenin olmadığı bölgelerdeki fotorezist ile temas etmektedir. UV ışın ile etkileşime giren fotorezist ise özelliğini kaybedip, özel bir kimyasal aracılığı ile banyo edildiğinde filmin üzerinden kolayca atılır. Bu kimyasalın

adı “developer” , işlemin adı ise “development” dır. İşlemin süresi 30 – 60 saniye aralığında değişim gösterebilmektedir. İstenmeyen bölgelerdeki fotorezistin tamamıyla filmin üzerinden kalkana kadar develop işlemi devam ettirilmelidir. 90 saniye ve üzerinde devam eden develop işlemlerinde, bir önceki adımlar tekrar gözden geçirilmeli, gerekirse develop ve fotorezist kimyasalları değiştirilmelidir. Bu adım mümkün olduğunca kısa tutulup fotorezistin altındaki ana malzemenin developer ile çok uzun süre temas halinde bulunup bozulma riski ortadan kaldırılmalıdır.

- 4) **Son tavlama ve aşındırma:** Önceki adımlar uygulanarak, film üzerinde oluşturulan fotorezist maskesi, kimyasal aşındırma işlemleri sırasında, filmin korunması istenilen bölgelerin aşındırıcı kimyasallar ile temasını engeller. Bu işlemin şüphesiz gerçekleşebilmesi için fotorezist ile film arasındaki temasın daha kuvvetli olması gerekmektedir. Bu sebeple, aşındırma işleminden önce film 105 °C de yaklaşık 2 dakika tavllanır. Ardından bir süre soğuması için bekletildikten sonra, aşındırılacak film için uygun asit çözeltisi hazırlanır ve film çözelti içerisine yerleştirilerek çok kısa bir süre içerisinde film üzerinde sadece istenilen bölgelerin kaldığı gözlemlenir. Aşındırılacak farklı filmler için farklı kimyasal malzemeler kullanılır. Herbir malzemenin aşındırılma süresi ve çözeltilerinin derişikliği birbirinden farklıdır. Bu açıdan da aşındırma işlemi her yönüyle çok hassas bir şekilde optimize edilmelidir. Gereğinden uzun süre aşındırma işlemi veya daha kısa süreler, üretmek istediğimiz çipin kalitesini de aynı ölçüde değiştirecektir. Bu sebeple, hazırladığımız maske üzerindeki desenin aynısının film üzerinde de oluştuğunu tam olarak gözlemleyene kadar optimizasyon işlemleri sürdürülmelidir.
- Bahsini geçirdiğimiz kimyasal aşındırma işlemlerinin dışında çok daha kontrol edilebilir ve çözünürlüğü çok çok daha yüksek aşındırma teknikleri mevcuttur. Kimyasal aşındırma işlemleri ıslak (wet) aşındırma olarak bilinirken, daha çok ion bombardmanı ile gerçekleştirilen (Dry) aşındırma işlemleri daha küçük ölçekte ve çok

daha keskin desenleme işlemlerinin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.

Aşındırma işleminin ardından filmin üzerinde fotoresist kalmış olacaktır. En son adım olarak fotoresist, aseton veya fotoresist stripper kullanılarak film yüzeyinden temizlenmelidir. Ardından standart ince film yüzeyi temizleme işlemleri uygulanarak elektriksel bağlantıları yapılıp test etmeye ve kullanmaya hazır hale getirilmelidir.

2.3. Elektriksel Bağlantılar ve Çip Paketleme

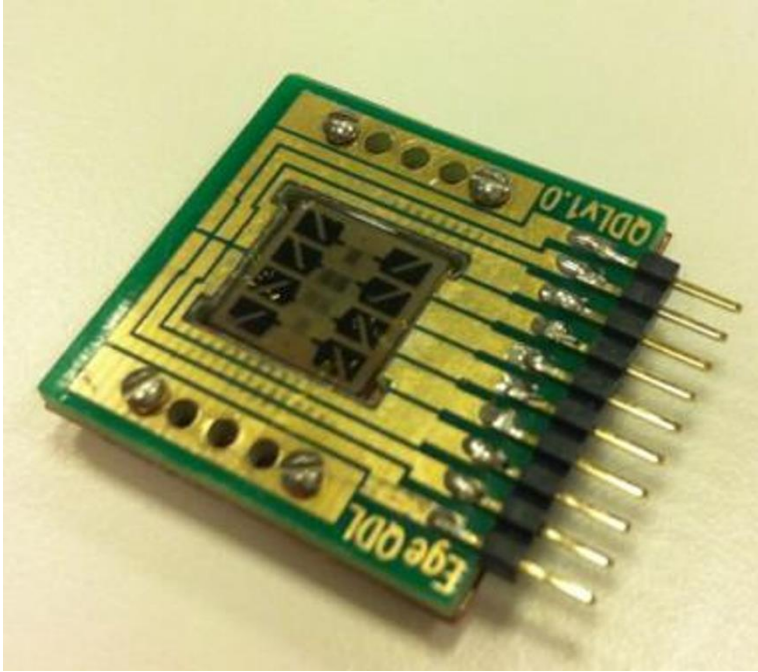
Yüksek sıcaklık süperiletkenleriyle geliştirilen küçük boyutlu elektronik aygıtlarda, çip paketleme, üretim boyunca karşılaşılan en kritik adımlardan birisidir. Aygıtların, uygulamalara uygun olarak geliştirilmiş çip-taşıyıcıların veya devre kartlarının üzerine entegrasyonu elektriksel tel bağlantıları (wire bonding) ve çipin üzerinin kapsüllenmesiyle gerçekleştirilir. Aygıtların elektriksel tel bağlantılarını yapabilmek için genellikle, çip üzerinde desenleme işlemi sırasında belirlenmiş kontak noktaları üzerine metal bir katman kaplanır. Bu sayede elektriksel bağlantılar için kullanılan metal (altın veya alüminyum) tel ile kontak noktaları arasında çok daha güçlü ve güvenilir bağlantılar yapılarak, aygıt üzerinden alınacak sinyal kalitesi artırılır ve böylelikle daha güvenilir sonuçlar elde edilir. Kontakın atılacağı diğer nokta olarak devre kartı kullanılır ve devre kartının yolları genellikle altın olarak temin edilmektedir.

Kontak noktalarının üzerine ek bir metal katmanı kaplamak için desenlenmiş filme ek buharlaştırma ve litografi işlemleri uygulamak gerekmektedir. Bu tip uygulamalar ana filmin özelliklerinde bir miktar bozulmalara sebep olmaktadır. Bunun önüne geçebilmek için, malzemelerin kontak noktaları üzerine metal tel bağlantılarının direk yapılabilmesi önemli bir alternatif uygulama olarak gösterilebilir. Bu sayede hem filmin dayanıklılığı artırılıp hem de çip paketleme işlemi için gereken süre önemli ölçüde azaltılır.

Bu tez çalışmasında yapılan bütün elektriksel tel bağlantıları, kontak noktaları üzerine metal katman kaplanmaksızın, altın tellerin YBCO kontak noktaları üzerine direk bağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin

güvenilirliğini gösterebilmek için ek bir çalışma planlanıp tamamlanmış, defalarca tekrarlanan agresif termal döngüler sonunda bile yapılan kontakların kopmadığı ve süperiletken bir YBCO aygıtın kritik akım ve kritik sıcaklık değerlerinin korunduğu gözlemlenmiştir.

Bu bölümün tamamında, elektronik bir ince film aygıtın nasıl üretileceğini inceledik. Nanometrik kalınlıkta bir ince film üretiminin ardından birkaç μm genişliğinde yollara sahip şekillerin ince film üzerinde ortaya çıkarılması için izlenmesi gereken adımları açıkladık. Bu yapının üzerinde belirlenmiş kontak noktaları ile çipin yerleştirildiği devre kartı arasında elektriksel bağlantıların nasıl yapılması gerektiğini inceledik ve çipin tamamı üzerine büyütülen kapsülleme katmanının son işlem olarak gerçekleştirilmesi gerektiğinden bahsettik. Kapsülleme katmanı, elektronik aygıtların çok daha uzun süre aynı performans ile çalışmasını sağlamak için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu işlemlerin tamamının adım adım takip edilmesiyle her hangi bir malzeme kullanılarak farklı kalınlıklarda filmler üzerine farklı genişliklerde hatlara sahip Şekil 9. da gösterildiği gibi bir elektronik aygıt üretilerek, test edebilmek mümkündür.



Şekil 5. Elektriksel bağlantılar ve kapsülleme işleminden sonra elektronik teste ve kullanıma hazır süperiletken YBCO mikroköprü aygıtı.

3. ÇOK KATMANLI YBCO SÜPERİLETKEN YAPILAR

Çok katmanlı yapıların işleminden önce, YBCO ve STO ince filmler ayrı ayrı tek katman olarak ele alındı. Katman sayısı arttıkça yüzey şartları bozulduğu ve bu sebeple de son katmanın süperiletkenlik özelliklerinde azalmalar gözlemlendiği için, ince filmleri büyütmek için kullandığımız (100) STO substrate hedef malzemeler ile aynı üretici tarafından temin edilelererek, farklı substratelerden kaynaklanacak istenmeyen etkiler minimum seviyeye indirildi. YBCO ince filmler, yüksek kritik sıcaklık (≥ 90 K), keskin geçiş genişliği (≤ 1 K), tek fazda diyamanyetik tepki ve yüksek kritik akım yoğunluğu (≥ 1 MA/cm²) 'na sahip filmler elde edebilmek üzere, dc-magnetron sputtering tekniği kullanılarak fabrikasyon parametreleri optimize edildi. Benzer olarak, STO ince filmler de YBCO ince filmler için iyi birer tampon ara katman olabilmek üzere rf-magnetron sputtering tekniği kullanılarak parametreler optimize edildi.

3.1. YBa₂Cu₃O_{7-x} / SrTiO₃ İnce Filmleri ile Çok Katmanlı Süperiletken Yapı Üretimi

Bütün ince film üretim parametreleri, in-situ büyüme işlemi doğrultusunda çok katmanlı YBCO ve STO ince film yapılarıyla oluşabilecek şekilde parametreler optimize edildi. Argon ve Oksijen kısmi basınçlarına bağlı büyüme oranı ve uygulanan güç substrate sıcaklığı ile birlikte en önemli üretim parametreleridir. Büyüme oranı önemli ölçüde bütün bir yapının kristal formasyonunu malzemelerin substarte üzerinde birikme miktarı cinsinden hesaplarken, substrate sıcaklığı ise temel olarak ince filmin kristal yönelimini tayin etmektedir ki bu yönelim aygıt fiziğinde çoğunlukla c-ekseni doğrultusunda olması istenir. Bu sebeplerle büyüme oranı ve substrate sıcaklığı epitaksiyel büyüme dinamiğinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Oksijenleme sıcaklığı, oksijen kısmi basıncı ve soğuma hızı YBCO ve STO ince film büyüme işlemlerinde ve özellikle çok katmanlı yapıların üretiminde rol alan diğer önemli kritik adımlardır. YBCO ince filmin yüksek sıcaklığa maruz kalması oksijen kaybına sebep olur ve dolayısıyla süperiletkenlik parametrelerinde bozulmalar gözlenir. Bu oksijen kaybını mümkün olduğunca yüksek miktarda tölere edebilmek için, ek oksijenleme işlemine genellikle

ihtiyaç duyulur. Bu kritik noktalar hesaba katılarak, bu çalışmadaki işlem parametreleri Tablo 1 de verilmiş üretim standardımızı oluşturan parametreler çok hassas bir şekilde değerlendirilerek elde edilmiştir. Ardından ince filmlerin büyüme şematiği; ısınma ve soğuma hızları, substrate sıcaklıkları, kaplama süresi, uygulanan güç, Ar/O₂ gaz oranları, oksijenleme basıncı ve zaman Şekil 1. de verilmiştir.

İlk olarak, tek kristal (100) STO substrate ultrasonik temizleyici ile sırasıyla aseton ve propanol banyosu içerisinde 10 dakika 50 °C sıcaklıkta temizlendi. Ardından temizlenen substrateler ultra-saf iyonlarından ayrıştırılmış su içerisinde durulanıp ultra-saf azot gazı ile kurutuldu. Bu temizleme adımları ince film üretimi için son derece önemlidir. Substrateler, üretici tarafından temiz-oda ortamlarında hazırlanıp paketlenmiş olsalar bile belirli bir süre sonunda kirlenmiş olmaları, tekrardan temizlik yapılmasını gerektirir. Substrate yüzeyinin kendi özelliklerinin dışında kir veya diğer istenmeyen bir tabaka ile kaplanması, üzerine büyütmek istediğimiz filmin özelliklerini doğrudan etkileyecektir. Bu sebeple substrate temizliği ilk adım olarak ince film fabrikasyonunda büyük önem taşımaktadır.

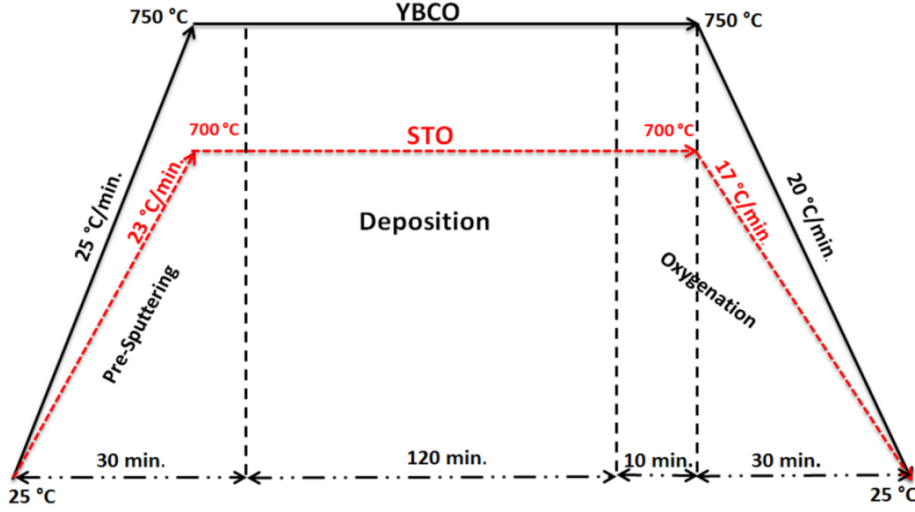
Temizlik adımının ardından, substrate sputter sisteminde bulunan ısıtıcı üzerine gümüş yapıştırıcı kullanılarak yapıştırıldı ve oda atmosferinde 150 °C ‘ye kadar ısıtılarak 10 dakika bekletildi ve gümüş yapıştırıcı içerisinde bulunan solventin uçması sağlandı. Böylelikle substrate ısıtıcı üzerine çok daha sağlam bir şekilde yapıştırıldı ayrıca solventin sputter sistemi içerisine yayılıp hedef malzemeler üzerinde istenmeyen kirlenmelerin önüne geçildi. Bu çalışmada kullanılan çok yüksek vakumlama kapasitesine sahip ince film üretim sistemi, üç ayrı rf/dc magnetron kaynağıyla donatılmış olup, vakum ortamında 360° dönebilen substrate tutucusuna sahiptir. Bu sayede substratelerin, üretilmek istenilen hedef malzemelerin altına kolaylıkla ayarlanabilmesi sağlanılmıştır. Substrate ile hedef malzeme arasındaki mesafe 5 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Substrate yerleştirildikten sonra, sputtering sistemi 1 x 10⁻⁷ mbar mertebesine kadar vakumlandı ve substrate sıcaklığı depozisyon sıcaklığı olarak belirlenmiş YBCO için 750 °C ve STO için 700 °C ‘ye ısıtıldı. Ardından gaz basıncı Tablo 1. de verilen değerlere ayarlandı. YBCO ince filmler silindirik hedef malzeme kullanılarak, STO ince filmler ise 2” çapında

hedef malzeme kullanılarak sırasıyla dc ve rf sputtering teknikleriyle yaklaşık 1,6 nm/min büyüme hızıyla üretildi. Yaklaşık 200 nm kalınlığında filmlerin üretimi için 2 saatlik sputtering işlemleri uygulandı. Bu şekilde optimize edilmiş üretim parametreleri yaklaşık 10 ayrı örnek üzerinde tekrar tekrar denendi ve elde edilen YBCO ince filmler elektriksel ve manyetik karakterizasyon (R-T ve χ -T) işlemlerine tabi tutularak YBCO ince filmlerin yeniden üretilebilirliği ve kalitesi tayin edildi.

Tablo 1. Magnetron Püskürtme sistemi için YBCO ve STO ince film üretim parametreleri

Malzemeler Parametreler	YBCO	STO
Taban vakum seviyesi	1 x 10 ⁻⁷ mbar	1 x 10 ⁻⁷ mbar
Substrate sıcaklığı	750 °C	700 °C
Uygulanan güç	70 W DC	75 W RF
P_{Ar} : P_{O2}	4:1	4:1
Toplam üretim basıncı	0,4 mbar	0,04 mbar
Üretim süresi	2 saat	2 saat
Film kalınlıklar	200 nm	150 nm
Oksijenleme işlem ve sıcaklıkları	10 dak. 1 mbar O ₂ gaz akışı 750 °C de	10 dak. 1 mbar O ₂ gaz akışı 700 °C de
Soğuma oksijenlemesi	700 mbar O ₂	700 mbar O ₂

STO ince filmlerin YBCO için yeterli özelliklere sahip kaliteli tampon tabaka olup olmadığını test etmek için, STO substrateler üzerine STO ince film deposit edildi. Ardından bu yapının üzerine büyütülen YBCO ince filmlerin süperiletkenlik özellikleri test edilerek standart tek katmanlı YBCO ince filmler ile kıyaslandı. Benzer özelliklere sahip yüksek kalitede süperiletken YBCO ince filmlerin her iki yöntemle de elde edildiği gözlemlendikten sonra Tablo 1. de verilen parametreler kullanılarak çok katmanlı yapının üretimine başlandı.

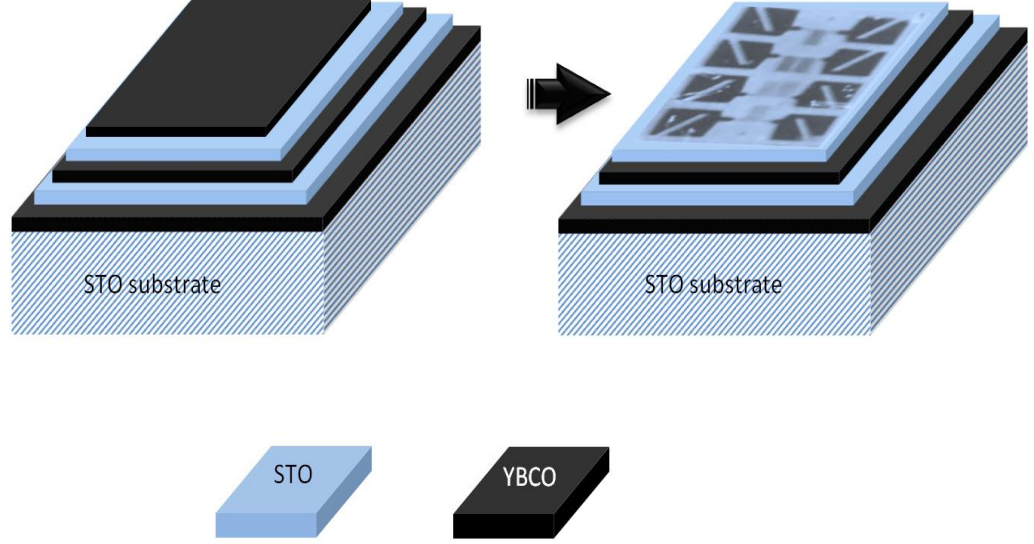


Şekil 6. Magnetron Püskürtme yöntemiyle YBCO ve STO ince filmlerin üretim diyagramları.

Çok katmanlı ince film yapısı, STO ve YBCO ince filmlerin sırasıyla YBCO ince film büyütülmüş STO substrate üzerine üretilmesiyle gerçekleştirildi. Bir sonraki katmanın üretiminden hemen önce örneklerin yüzeyi birer dakika aseton ve alkol içerisinde temizlenerek herhangi bir kirlenmenin iki katman arasında oluşturabileceği pin-hole formasyonu engellendi. Bu veya başka bir sebeple oluşabilecek pin-hole ler çok katmanlı yapılarda karşılaşılabilecek iki süperiletken hat arasındaki kısa devre hatasının temel sebebidir. En mükemmel sonuç, örneği vakum ortamından hiç çıkarmadan bütün katmanların art arda in-situ büyütme yöntemiyle üretilmesidir. Ancak, her bir depozisyon işleminden sonra parametrelerde bir bozulma olup olmadığını anlayabilmek için bir takım ölçümler uyguladık. Ayrıca, YBCO katmanları arasında olası bir kısa devre ihtimalini önlemek için mekanik maskeler kullandık ve katmanların kenarlarını kapattık. Bu maskeler aynı zamanda ileriki elektriksel ölçümler için gerekli olacak kontak noktalarının da YBCO ince filmler üzerinde açık kalmasını sağladı. Örnekler her bir depozisyon işleminden sonra vakum ortamından dışarı çıkarıldı test edildi ve tekrardan sisteme yerleştirilerek bir sonraki katmanın üretimine geçildi. Bu sebeple de ek temizleme işlemi uygulanması gerekti.

Herbir sonraki katmanın üretiminden önce mekanik maskeler YBCO ince film tarafından elektriksel kontaklar için 1 mm ve kısa devreyi önlemek için de 0,5 mm diğer taraflardan içeriye doğru kaydırıldı. STO katmanların her bir tarafından kenar açıklığı 0,5 mm olarak ayarlandı. Başlangıç substrate

ölçüleri 10 mm x 10 mm olduğu için en üst katmanda bulunan YBCO ince filmin yüzey alanı bu ölçülere göre 5 mm x 5 mm olarak Şekil 7. de görüldüğü gibi elde edildi.

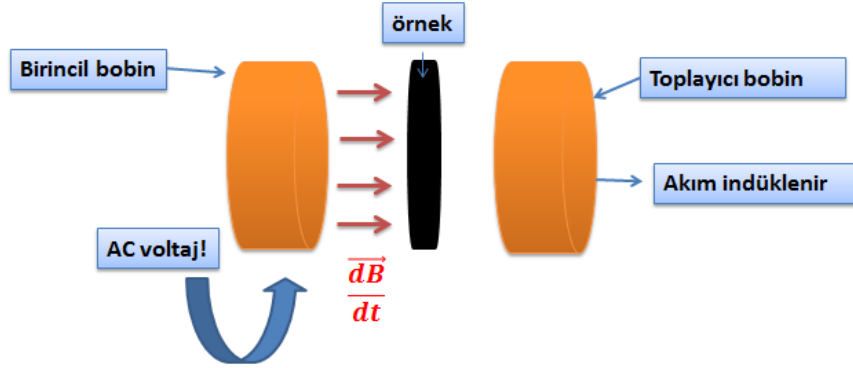


Şekil 7. STO substrate üzerine büyütülmüş YBCO/STO/YBCO/STO/YBCO çok katmanlı yapısı ve en üstte bulunan mikroköprünün şematığı. Kenar açıklıkları elektriksel kontakların alınabilmesi ve YBCO katmanları arasında kısa devre olasılığının önüne geçilebilmesi için mekanik maske kullanılarak yapılmıştır.

3.2. Çok Katmanlı $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Süperiletken Yapısının Karakterizasyonu

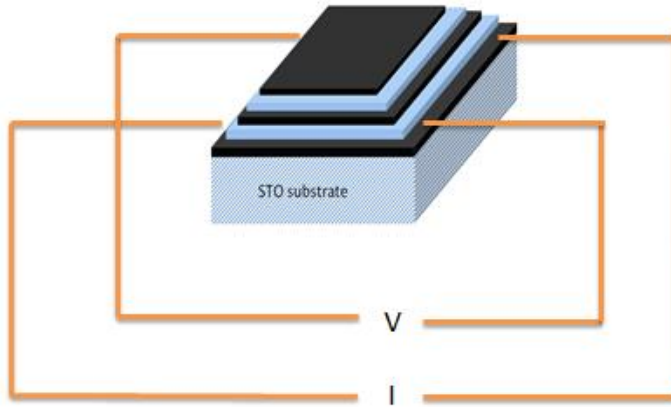
YBCO ince filmlerin üretim işlemleri boyunca süperiletkenlik geçiş karakteristiğini test edebilmek için, ac manyetik suseptibilite – sıcaklık (χ -T) ve dc direnç- sıcaklık (R-T) ölçümleri sistematik olarak uygulandı. Ac manyetik suseptibilite ölçümleri vakumlanabilir sıvı azot kryostatlarda Şekil 8 de gösterildiği gibi gerçekleştirildi. χ -T ölçümü karşılıklı indüktans yöntemiyle, çift bobin sistemi 1 kHz ac sinyal ile beslenerek ve lock-in amplifier (Stanford Research System SR530) ile kontrol edilerek gerçekleştirildi. Faz içi (χ') ve faz dışı (χ'') sinyaller sıcaklık verileriyle birlikte bilgisayar aracılığıyla toplandı. Sıcaklığı kontrol etmek için LakeShore LS331 sıcaklık kontrolcüsü kullanıldı. Üst katmanların üretiminin, alt katmanlarda bulunan filmlerin özelliklerine

etkilerini gözlemleyebilmek için bu ölçüm her bir ince film üretim işleminden sonra tekrarlandı.



Şekil 8. Ac manyetik susepibilite – sıcaklık ölçüm mekanizmasının temsili şematığı.

Direnç – sıcaklık ölçümleri için dc 4 nokta tekniği, Şekil 9’da gösterildiği gibi uygulanarak 25 μm Au teller YBCO kontak noktalarına wire-bonding sistemi aracılığıyla herhangi bir ek lithografik işlem ve metal buharlaştırma işlemi yapılmaksızın direk olarak yapıştırıldı. Bu adımların atlanması YBCO ince filmlerin özelliklerinin korunmasında önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 9. Dc direnç-sıcaklık ölçümü için uygulanan 4 nokta tekniğinin şematik gösterimi.

STO ince filmlerin iletkenliği içerisinde bulunan oksijen miktarı ve kendi ABO_3 olan stokiyometrisiyle alakalı olduğu için (SrTiO_2 iletken ancak SrTiO_3 yalıtkan), yapılan STO ince filmlerin elektriksel testlerini yapmak da aynı ölçüde önem taşımaktadır. Bu sebeple, her bir STO ince film

üretimi gerçekleştirildikten sonra basit bir direnç ölçümü STO ince filmlerin üzerinden yapıldı ve yüzey direncinin 200 mega-ohm lardan çok daha yüksek olduğu gözlemlendi. Bu sonuç filmlerin istediğimiz stokiometride olduğunu göstermiştir ki bizim bu çalışmada ihtiyacımız olan yalıtkan fazda kristal STO ince filmlerdir.

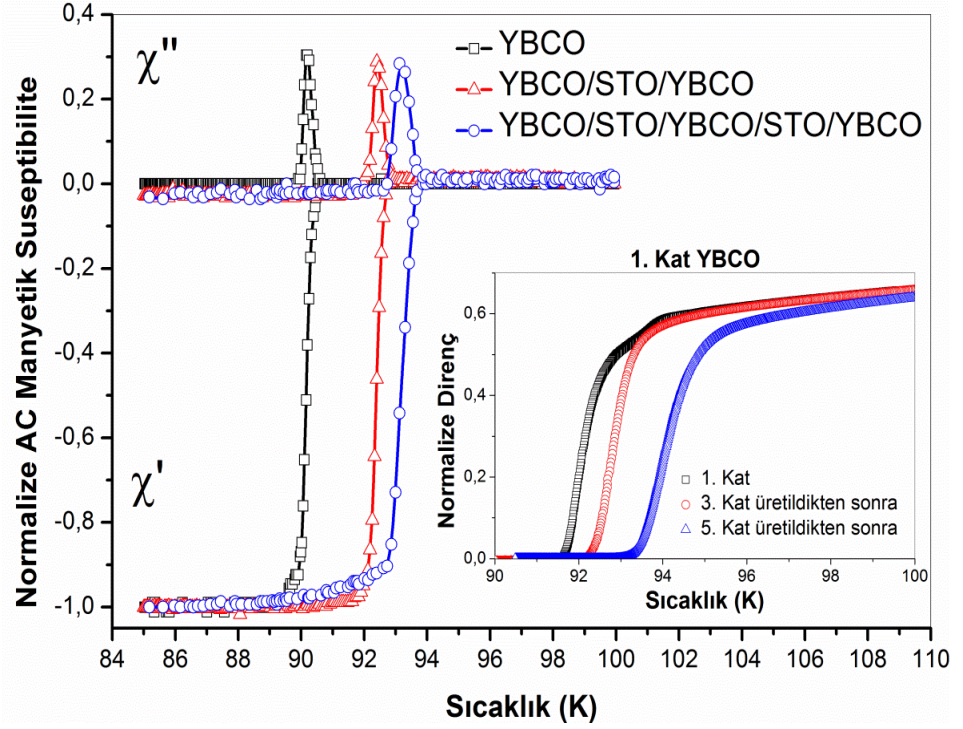
YBCO/STO/YBCO/STO/YBCO şeklindeki çok katmanlı yapının üretiminin ardından, bu yapının aygıt karakteristiği en üst YBCO katmanı ile akım-gerilim ve direnç-sıcaklık ölçümleri cinsinden test edildi. Bu sebeple, YBCO ince film 25 μm genişliğinde kıvrım şeklindeki mikro köprüler oluşturacak şekilde standart fotolitografi ve ıslak (kimyasal) aşındırma işlemleri uygulanarak desenlendi. Şekil 7 de planlama görülmektedir. İlk olarak R-T ölçümü mikro köprüler üzerinden gerçekleştirilmiş ve desenleme işleminden kaynaklı süperiletkenlik özelliklerinde herhangi bir bozulma olup olmadığı test edilmiştir. Elektriksel kontaklar, mikro köprülerin testleri için de bütün bir ince film testlerine benzer olarak yapılmıştır. I-V ölçümleri ise örneği 77 K sıcaklığına kadar soğuttuktan sonra bu sıcaklıkta Şekil 8’de R-T ölçümü için kullanılan teknikle yapılmıştır.

3.3. Analiz Sonuçları ve Tartışma

Ac manyetik suseptibilite – sıcaklık ölçümü bir örneğin tamamına ait manyetik sinyallerle ilgili bilgi verdiği için, daha çok tek katmanlı filmlerin diyamanyetik özelliklerini analiz etmek için kullanılan bir yöntemdir (Salamatı et al., 2004). Fakat bu çalışmada üretilen çok katmanlı yapının manyetik alınganlık ölçümünde bütün YBCO katmanlarının tepkisi toplam sinyale katkıda bulunacağı için χ -T eğrisinden direk olarak tekil YBCO ince filmlerin diyamanyetik özelliklerini anlayabilmek mümkün olmayabilmektedir. Fakat çok katmanlı bir yapıdaki birbirinden bağımsız katmanların süperiletkenlik faz geçiş profiline etkisini analiz edebilmek için, ölçüm sisteminin birincil bobinine ait çıkış manyetik alan değeri ac manyetik suseptibilite ölçümünde kullanılan karşılıklı indüktans metoduna göre ayarlanabilir. Eğer ki ac manyetik alan değeri mümkün oldukça düşük tutulabilirse, bu durumda oluşacak düşük alan değerlerinin faz geçiş profiline etkisi de o kadar az

olacağından, sadece en yüksek kritik sıcaklığa sahip katmanın diyamanyetik faz geçiş profili gözlemlenmiş olacaktır. Bu durumun tam aksine, ac manyetik alan değerleri çok yüksek seviyelere çıkartılır ve bununla birlikte, analizi yapılacak çok katmanlı yapıda bulunan katmanların birbirinden farklı kiritik sıcaklık değerlerine sahip oldukları düşünülürse, faz geçiş profilinde her bir katman için farklı bir faz geçişinden kaynaklı basamaklı bir grafik gözlemleyebiliriz. Bu tür bir sistemin analizi ileriki çalışmalarda yapılmak üzere planlanmıştır.

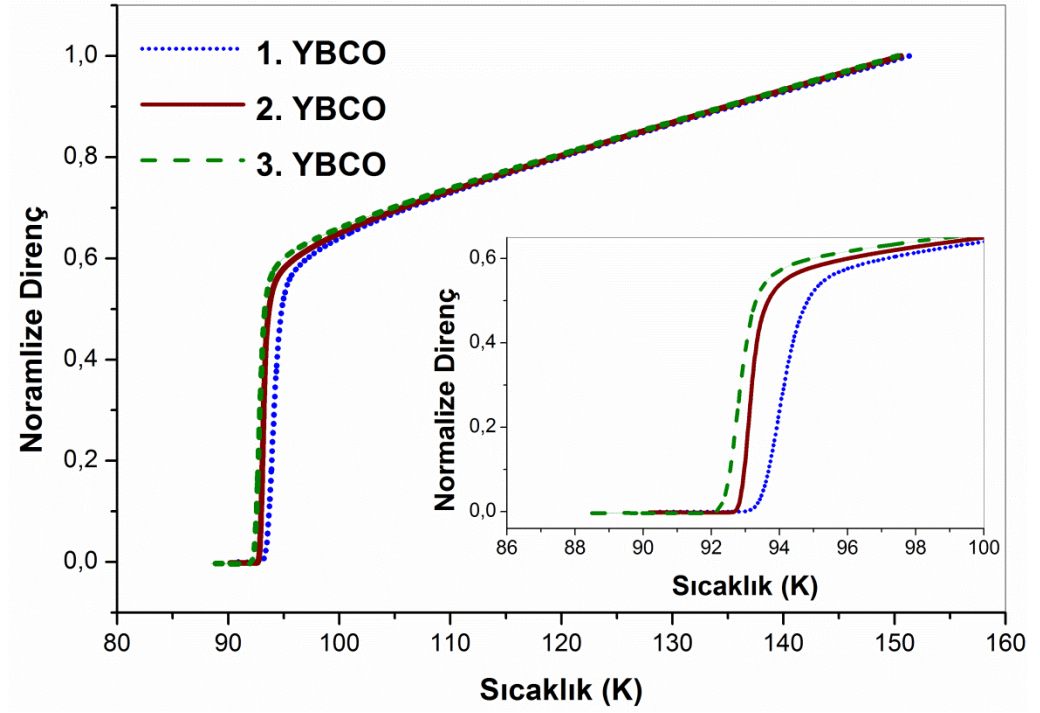
Bu çalışmada, ac manyetik suseptibilite ölçümü referans verisi olmak üzere tek katmanlı YBCO ince film için gerçekleştirilmiş ve ardından her bir katmanın üretiminden sonra tekrarlanmıştır. Tek katman YBCO ince filmler için diyamanyetik faza geçiş 90 K de ve yaklaşık 2 K lik bir sıcaklık aralığında gözlemlendi. Üzerine devam edilen STO katmanının üretilmesi ve hemen ardından üzerine depozit edilen YBCO katmanı için suseptibilite ölçümü tekrarlandı. Diyamanyetik faz geçişi bu ölçüm için bir öncekine benzer bir profilde ancak 92 K de gerçekleşti. Fabrikasyonun devamı olarak 2. STO arakatmanı büyütüldü ve akabinde enüst katman olan 3. YBCO ince film üretildi ve aynı ölçüm tekrarlandı. Son ölçümde de diğerleriyle hemen hemen aynı faz geçiş profili gözlemlenirken bu sefer kritik sıcaklığın 93 K 'e arttığı gözlemlendi. Üretimi tamamlanan bu 3 YBCO ince filmlerden oluşan çok katmanlı yapıda çok enterasan ve beklenmedik bir sonuç olarak, Şekil 10'da gösterildiği gibi, faz geçiş kritik sıcaklıkları her bir ölçüm için keskin ve tek fazlı olmasıyla beraber, katman sayısı arttırıldıkça kritik sıcaklık artmaktadır.



Şekil 10. Ac manyetik suseptibilite – sıcaklık ölçümleri. Ölçümler her bir YBCO ince film üretiminin ardından yapılmıştır. Katman sayısı arttıkça geçiş sıcaklığındaki kayma açık bir şekilde görülmektedir. İç kısımda bulunan şekil ise, birinci YBCO ince filmin dirence bağlı olarak kritik sıcaklığındaki kaymaları göstermektedir.

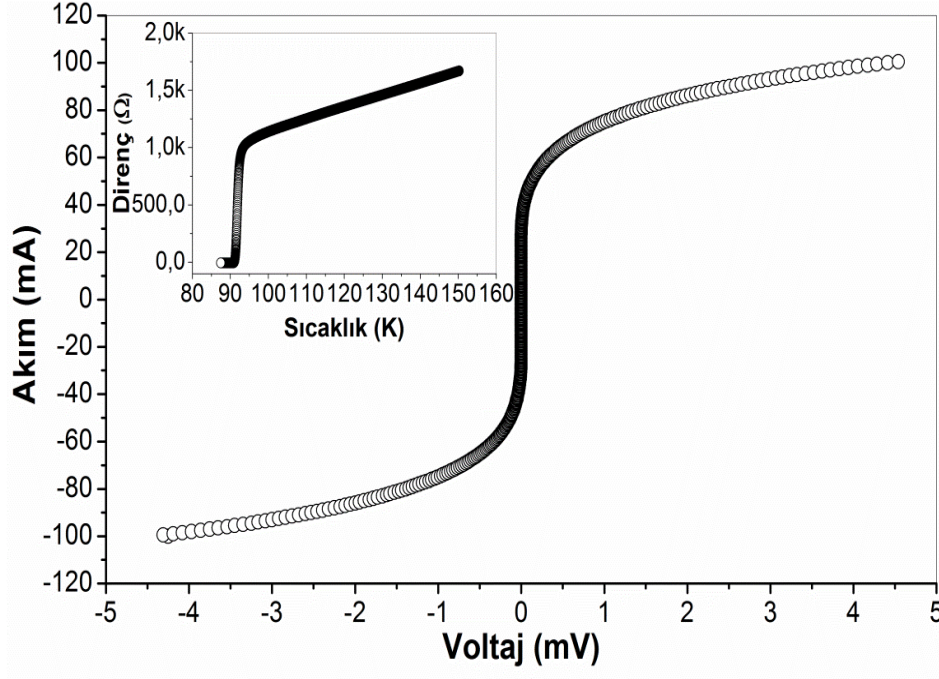
K. A. Müller ve A. Shengalaya ‘nın yaptıkları son çalışmalardan birisine göre, doymun olmayan (underdoped) yapıdaki cuprate-tipinde süperiletken ince filmler, çok yüksek dielektrik sabitine sahip yalıtkan malzemelerin (STO gibi) arasında kalacak şekilde (sandwich-yapıda) üretilirse, bu süperiletken malzemelerin kritik sıcaklıkları, tek başlarına üretildiklerinde sahip oldukları değerin üzerine çıkar (Müller et al., 2013; Kresin et al., 2012). Bizim çalışmamızda da, başlangıçta en alt katmanda bulunan tek kat YBCO ince filmin kritik sıcaklığı 90 K olarak ölçülmüştü. Bu filmin üzerine STO ince filmin büyütülmesinden sonra, oksijen kaybından kaynaklı olarak doymun olmayan bir YBCO ince film formasyonu iki yüksek dielektrik sabitine sahip katmanın (STO substrate ve STO arakatman) arasında elde edilmiş oldu. Bu sebeple de, en alt YBCO ince film katmanının ait kritik sıcaklık değeri 92 K e artmış olabilir. Fabrikasyonun devamı olarak gerçekleşen diğer STO katmanının üretilmesiyle birlikte de bir miktar daha oksijen kaybı gerçekleşmesi faz geçiş kritik sıcaklığını 93 K’ e kadar çıkartmış olabilir. Eğer ki geçiş sıcaklığındaki bu kayma K. A. Müller’ in öngörüsüyle aynı sebepten

ötürü gerçekleşiyorsa, birinci YBCO ince filmin faz geçiş sıcaklığının en yüksek değere sahip olduğu sonucuna varılır. Bu durumda, birinci YBCO ince film katmanını diğer süperiletken ince filmlerden daha önce süperiletken faza geçeceği için, Şekil 10'da gösterilen ac manyetik suseptibilite ölçümü sadece birinci YBCO ince filmi temsil etmektedir. Bu durumda üst katmanlar kendi kritik sıcaklıklarına ulaşarak süperiletken faza geçmeden önce, en alt YBCO ince film diyamanyetik faza geçtiği için, üst katmanları manyetik olarak korumuştur. Şekil 10'un iç kısmındaki grafikte de görüldüğü üzere kritik sıcaklıktaki kayma R-T ölçümüyle de gözlenmiştir. Direnç-sıcaklık ölçümleri her bir katmanın üretiminden sonra en alt YBCO ince film üzerinden tekrarlanmıştır. Bütün çok katmanlı yapının üretiminin tamamlanmasının ardından, bu yapıda bulunan bütün filmlerin son durumdaki süperiletkenlik özelliklerini test edebilmek için her bir YBCO ince film için ayrı ayrı R-T ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu durumda elektriksel kontaklar sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü YBCO katmanlarına yapıldı ve sonuçlar Şekil 11'de gösterildiği gibi her bir katman için ayrı ayrı verildi. Bu sonuçlara göre, normal durumda bütün YBCO ince filmler metalik davranış sergilemiştir. Ardından kritik sıcaklıklara yaklaştığında ~ 1 K'lık geçiş aralığında süperiletken faza her bir katmanın geçtiği gözlenmiştir. En üst ve ara katman YBCO ince filmlerin kritik sıcaklıkları sırasıyla 92 K ve 92,5 K olarak gözlenmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, en alt katmanda bulunan YBCO ince filmin kritik sıcaklığı 93 K olarak ölçülmüştür. YBCO ince filmlere ait direnç değerlerinde önemli miktarda bir farklılık gözlenmediği için ve her bir YBCO ince film hakkında daha karşılaştırmalı ve anlamlı bilgi verebilmek için normal durum dirençleri $1'$ e normalize edildi ve Şekil 10 ve 11'in iç kısımlarında verildi. Her bir YBCO ince filmin normal durumdaki direnç değerleri 300 K sıcaklığında 80 – 100 Ohm aralığında elde edilmiştir.



Şekil 11. Çok katmanlı yapıda bulunan her bir YBCO ince filmin dc direnç – sıcaklık karakteristikleri verilmiştir. 1. 2. Ve 3. YBCO ince filmler üretim işleminin tamamlanmasının ardından ayrı ayrı karakterize edilmiştir. İç kısımda bulunan grafik, aynı R-T eğrisini dar bir aralıkta göstermektedir.

Ac manyetik suseptibilite ve dc R-T ölçümlerinin sonuçları ele alındığında, optimize edilen üretim parametreleriyle birlikte 3-YBCO ince filminden oluşan çok katmanlı yapının fabrikasyonu tamamlanmıştır. Bu türden bir, çok katmanlı yapı birtakım özel uygulamalar için yüksek sıcaklık süperiletkenlerine ait çok katmanlı aygıt fabrikasyonunda da kullanılabilir. Yapının aygıt performansını test etmek için, en üst YBCO ince film katmanı mikro-köprüler şeklinde desenlendi ve I-V karakteristiği analiz edildi.



Şekil 5. 5 katlı olarak üretilmiş çok katmanlı yapının en üst katmanında bulunan 25 μm lik yol genişliğine sahip YBCO mikroköprünün DC akım-voltaj karakteristiği. 77 K de ölçülen kritik akım değeri 40 mA dir. Aynı mikroköprülere ait direnç – sıcaklık karakteristiği iç kısımda gösterilmiştir.

Mikro-köprü desenleri üzerinden R-T ölçümü gerçekleştirildi ve desenlenmiş yapıya ait süperiletkenlik faz geçiş sıcaklığı gözlemlendi. Şekil 12 ‘nin iç grafiğinde de görüldüğü üzere, mikro-köprü olarak desenlenmiş en üst YBCO ince filmin kritik sıcaklığı 92 K ve geçiş aralığı oldukça dardır. Bu da yüksek kaliteye sahip süperiletken bir aygıt üretilmiş olduğunun önemli bir kanıtıdır. Ayrıca aynı aygıt üzerinde 77 K sıcaklığında dc akım -100 mA den 100 mA aralığında uygulanarak aygıtın voltaj tepkisi gözlenmiş ve akım gerilim grafiği elde edilmiştir. Şekil 12’de gösterildiği gibi, 25 μm genişliğindeki desenlere ait kritik akım değeri 40 mA olarak ölçülmüştür ki bu da 200 nm kalınlığındaki YBCO ince filmlerin $\sim 1 \text{ MA/cm}^2$ ‘lik bir kiritik akım yoğunluğu değerine sahip olduğunu gösterir.

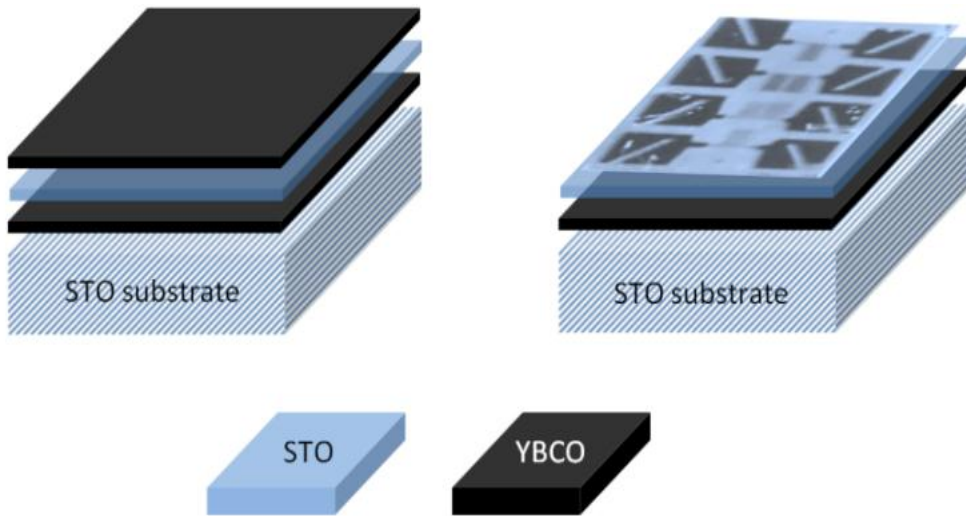
4. ÇOK KATMANLI SÜPERİLETKEN AYGITLARIN MANYETİK KALKANLANMASI

4.1. Süperiletken $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ Film ve Mikro Köprülerin Üç- Katlı Yapıda Üretilmesi

Çok katmanlı yapının tek bir substrate üzerine büyütülmesi için bir önceki kısımda YBCO ve STO ince film üretimleri için ayrı ayrı optimize edilmiş üretim parametreleri kullanıldı. Buna göre, ilk olarak tek kristal (100) STO altlıklar standartlaşmış temizlik işlemine tabi tutuldu ve ultrasonik temizleme tekniğiyle 10 ar dakika sırasıyla aseton ve alkol banyolarında temizlenip ultra-saf su ile durulanıp azot gazı ile kurutuldu. Ardından gümüş yapıştırıcı kullanarak substrate sputter sisteminde bulunan ısıtıcı üzerine yerleştirildi ve sistem 1×10^{-7} mbar mertebesine kadar vakumlandı. İstenilen vakum seviyesine ulaşılmasının ardından substrate Tablo 1. de verilen kaplama sıcaklığına ısıtıldı. Buna göre YBCO ince filmler 750°C sıcaklıkta ve toplam $\text{Ar}:\text{O}_2$ 4:1 oranına sahip 0.4 mbar gaz basıncı altında üretilmiştir. YBCO ince filmlerin büyüme oranı silindirik YBCO hedefi için 70 watt'lık dc güç altında 1.6 nm/min olarak ayarlanmıştır. Bu orana göre 200 nm kalınlığında ince filmlerin üretilebilmesi için üretim süresi 2 saat olarak belirlenmiştir. STO ince filmler ise 700°C sıcaklıkta ve toplam $\text{Ar}:\text{O}_2$ 4:1 oranına sahip 0,04 mbar kısmi gaz basıncı altında üretilmiştir. STO ince filmlerin büyüme hızı ise 2" çapında düzlemsel hedef için 75 watt'lık rf güç uygulanacak şekilde, 1,25 nm/min olarak ayarlanmıştır. Belirlenen parametreler uygulanarak 2 saatlik ince film büyütme işlemi sonunda 150 nm kalınlığında STO filmler üretilmiştir. Her iki film için de ek oksijenleme işlemleri film üretimlerinin tamamlanmasının ardından uygulanmıştır. Buna göre YBCO ince filmler 750°C de üretildikten sonra bu sıcaklıkta sabit tutularak 10 dakika boyunca 1 mbar O_2 atmosferinde bekletilmiş ardından O_2 basıncı 700 mbar a çıkartılmış ve bu basınç altında sistem oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır. Aynı oksijenleme işlemi STO ince film üretimi için de uygulanmıştır. STO ince filmlerin üretim sıcaklığı 700°C olduğu için oksijenleme işlemi için de bu sıcaklık kullanılmıştır.

Bu çalışmada iki farklı YBCO ince film örnekleri hazırladık: 1) YBCO ince filmler STO altlıklar üzerine büyütüldü ve işlem parametrelerine bağlı olarak süperiletkenlik özelliklerini analiz edebilmek için elektronik ve manyetik karakterizasyon işlemleri uygulandı. 2) Diğer örneklerde ise YBCO ince filmler daha önceden STO ince film kaplanmış STO substrateler üzerine büyütüldü ve bir önceki örneklerdeki karakterizasyon işlemleri uygulandı. Bu farklı işlemlerin uygulanıp, analiz sonuçlarının kıyaslanmasıyla birlikte optimize edilmiş üretim parametreleriyle elde edilen STO ince filmlerin YBCO ince filmler için yeterli kaliteye sahip tampon tabaka özelliklerine sahip olup olmadıkları test edildi. Örnekleri test etmek için sırasıyla ac manyetik suseptibilite – sıcaklık (χ -T) ve dc direnç – sıcaklık (R-T) ölçümleri uygulandı.

Tablo 1’de verilen parametrelere göre çok katmanlı YBCO/STO/YBCO yapısı film yüzeylerinin kirlenmesini önlemek için örneği sistemden dışarı çıkarmaksızın YBCO ve STO katmanlarının sırasıyla büyütülmesi ile üretildi. Çok-hedefli püskürtme sistemimize ait örnek tutucu ve ısıtıcı 360° dönebilmesi sebebiyle, sistemin vakumunu bozmaksızın örnek film yapılmak istenen hedef malzemenin karşısına kolayca ayarlandı. 3-katmanlı ince film yapısının üretilmesinin ardından, en üst YBCO katmanı şekil 11 de görüldüğü gibi kıvrımlı-tipte 20 μm lik yol genişliğine sahip mikroköprüler şeklinde desenlendi. Bu desenleme işlemi için standart fotolitografi ve kimyasal aşındırma işlemleri uygulandı.



Şekil 6. Süperiletken YBCO mikroaygıtta YBCO/STO/YBCO formasyonunda çok katmanlı bir şekilde üretilerek entegre edilmiş süperiletken YBCO ince film manyetik kalkanı.

Çok katmanlı süperiletken YBCO aygıtın karakteristik özelliklerinin, standart tek katmanlı YBCO aygıtın özellikleriyle karşılaştırılabilmesi için, başka bir STO substrate üzerine aynı üretim parametreleri kullanılarak, tek katmanlı YBCO mikroköprüler üretildi.

4.2. Aygıt Karakterizasyonu ve Manyetik Kalkanlama Uygulaması

Desenleme işlemlerinin ardından χ -T ölçümü bütün birçok katmanlı yapı üzerine uygulanarak en alt YBCO süperiletken filmin diyamanyetik davranışı test edildi. Bu ölçüm için bir önceki çalışmada Şekil 8’de kullanılan ac manyetik suseptibilite ölçüm sistemi kullanılarak aynı ölçüm tekniği uygulanmıştır.

Üst katmandaki YBCO mikroköprünün süperiletkenliğe geçişi dev R-T ölçümüyle Şekil 9’ da gösterildiği gibi test edildi. DC 4-nokta ölçümü, aygıtın YBCO kontak noktaları ile altın yollara sahip devre kartı arasında wire bonding tekniği ile bağlantılarının yapılması sonrasında gerçekleştirilmiştir. Çip paketleme işlemi tamamlandıktan sonra bakır altlığa sahip devre kartı, vacumlanabilir sıvı azot kryostatın içerisinde bulunan bakır uç üzerine monte edilmiştir. Ölçümde akım uygulamak için Keithley-224 akım kaynağı ve voltaj okumak için Keithley-199 DMM kullanılmıştır. Sıcaklık Lakeshore 331 sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilmiş ve çip üzerinden gelen verilen bilgisayarda toplanmıştır.

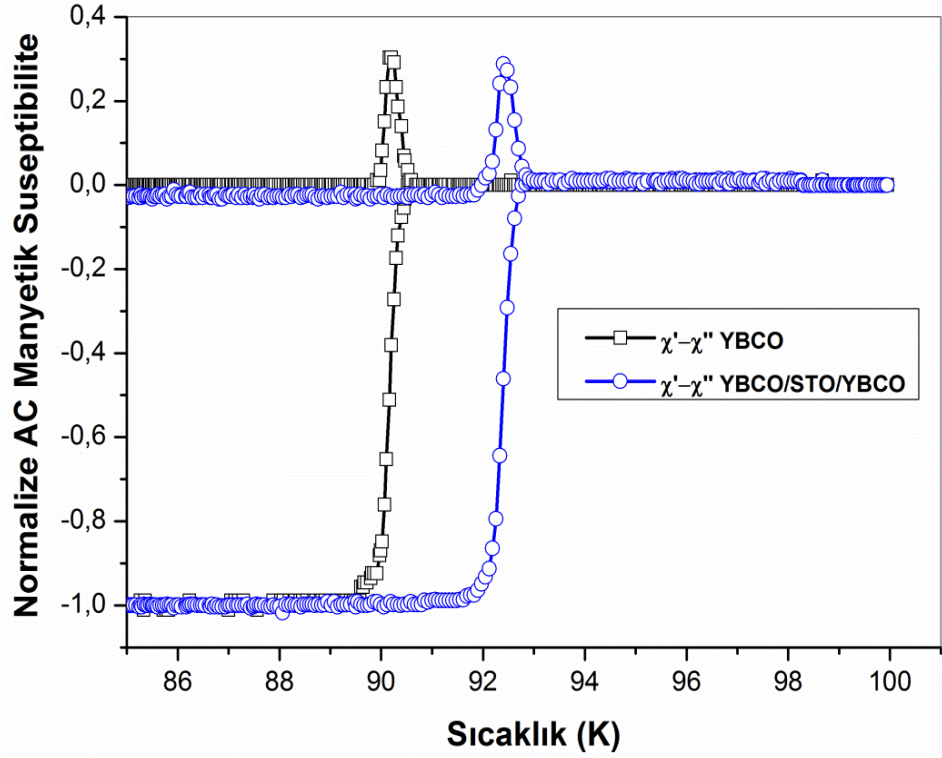
Çiplerin kritik akımlarının manyetik alana bağımlılığı I-V eğrileri üzerinden ölçüldü. Bunun için, neodymium sabit magnetler dc manyetik alan kaynağı olarak kullanılmak üzere sıvı azot kryostata monte edildi ve I-V ölçümleri sırasında manyetik alan değerleri sırasıyla 0 mT, 30 mT, 60 mT ve 100 mT olacak şekilde ayarlayabilmek için kullanılan mıknatıs sayısı artırıldı. I-V ölçümleri hem tek katmanlı hem de çok katmanlı YBCO mikroköprüler için dış manyetik alanlar altında yapıldı ve en alt YBCO süperiletken filme ait manyetik kalkanlama etkisi açık bir şekilde çok katmanlı yapıda gözlemlendi. Tüm bu işlemlerin ardından bütün bir yapı oda sıcaklığında STO ince film ile

kapsülleme katmanı olarak kaplandı ve çipin çevresel faktörlerden ve termal döngülerden etkilenecek özelliklerini kaybetmesi engellendi.

4.3. Performans ve Analizler

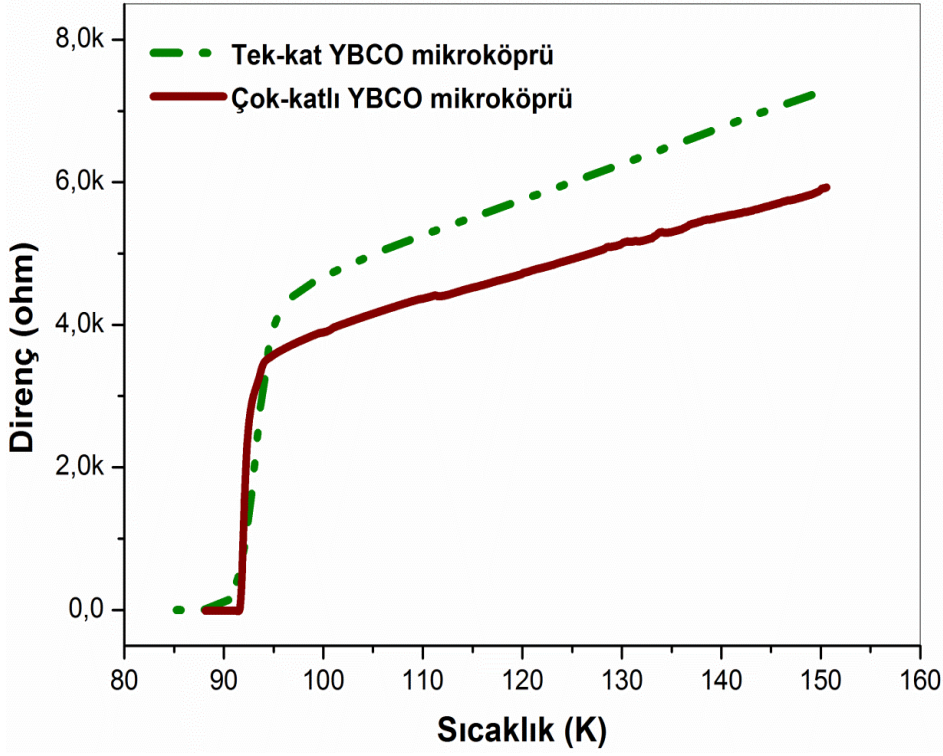
YBCO/STO/YBCO/STO/YBCO şeklinde üretilmiş çok katmanlı yapının süperiletkenlik özellikleri test edilmesinin ardından üretim parametreleriyle birlikte yapının aygıt uygulamaları için yeterli bir yapıya sahip olduğu tespit edildi. Bu sonuçla birlikte sandwich-tipinde bir süperiletken YBCO ince film çok katmanlı yapısının uygulaması tasarlanıp uygulanarak yüksek sıcaklık süperiletkenleri uygulamaları için elverişliliği test edildi. Bu bağlamda fabrikasyon bölümünde bahsedilen YBCO-kalkan/STO/YBCO-mikroköprü yapısı üretildi ve süperiletkenlik özellikleriyle birlikte en alt katmanın üst kattaki süperiletken aygıt üzerindeki manyetik kalkanlama potansiyeli incelendi.

Sıcaklığa bağlı ac manyetik suseptibilite (χ -T) ölçümleri hem tek katmanlı ince film hem de çok katmanlı yapının tamamı için yapıldı. Şekil 14’de görüldüğü gibi doğru bir karşılaştırma yapabilmek adına hem tek katmanlı hem de çok katmanlı yapının en alt süperiletken filminin eğrileri birlikte verilmiştir. Bu ölçümler kontak bağlantılarını yapıp film yüzeylerini kirletmeksizin sadece süperiletkenlik faz geçiş profillerini ve kritik sıcaklık değerlerini test edebilmek için yapılmıştır. Çok katmanlı yapıda bulunan üst katmanın manyetik tepkiye bir katkısı yoktur çünkü film, ölçüm yapılmadan önce mikrometre ölçeğinden desenlenmiştir. Şekil 14’de verilen eğrilerin amacı, çok katmanlı yapının üretimi sırasında filmin süperiletkenlik geçişinde bir iyileşme veya bozulmanın olup olmadığını gösterebilmektir.



Şekil 14. YBCO ince filmlerin AC manyetik suseptibilite – sıcaklık eğrileri. (□) datalar tek katmanlı YBCO ince filme ait sinyalleri ve (○) datalar ise çok katmanlı yapıda bulunan en alt katmana ait YBCO ince filmin sinyallerini temsil etmektedir.

Bu grafiğe göre, standart tek katmanlı YBCO ince film 90 K kritik sıcaklık değerinde oldukça keskin bir faz geçiş profiline sahiptir ki bu profil YBCO için bilinen karakteristik bir faz geçiş profilidir. Fakat, çok katmanlı yapıda bulunan alt katman YBCO ince filmin faz geçiş sıcaklığı 92 K' e çıkmıştır. Buna sebep olarak üst katmanların üretimi sırasındaki ısıl işlemler gösterilebilir. Birinci katmandaki YBCO ince filmin oksijen boşluklarındaki artışın kabul edilebilir miktara ulaşması genellikle kritik sıcaklık değerindeki artışın sebeplerinden biri olarak gösterilmektedir (Müller et al., 2013; Kresin et al., 2012). Bu çalışmanın temel hedefinin tamamen dışında olan kritik sıcaklıktaki artışı bir kenara bırakırsak, şekil 14'de de görüldüğü üzere YBCO ince filmlerin STO ara katmanlarla birlikte çok katmanlı yapıda üretilmesi ve litografik işlemler ile birlikte kimyasal aşındırma işlemleri genel olarak YBCO ince filmlerin her ikisine birden olumsuz bir etkiye bulunmamıştır. Bu sonuçla birlikte, alt katman YBCO ince filmin diyamanyetik özelliklerindeki yeterlilik bu katmanın YBCO mikroaygıt üzerinde manyetik kalkan olarak kullanılabilmesini uygun hale getirmiştir.



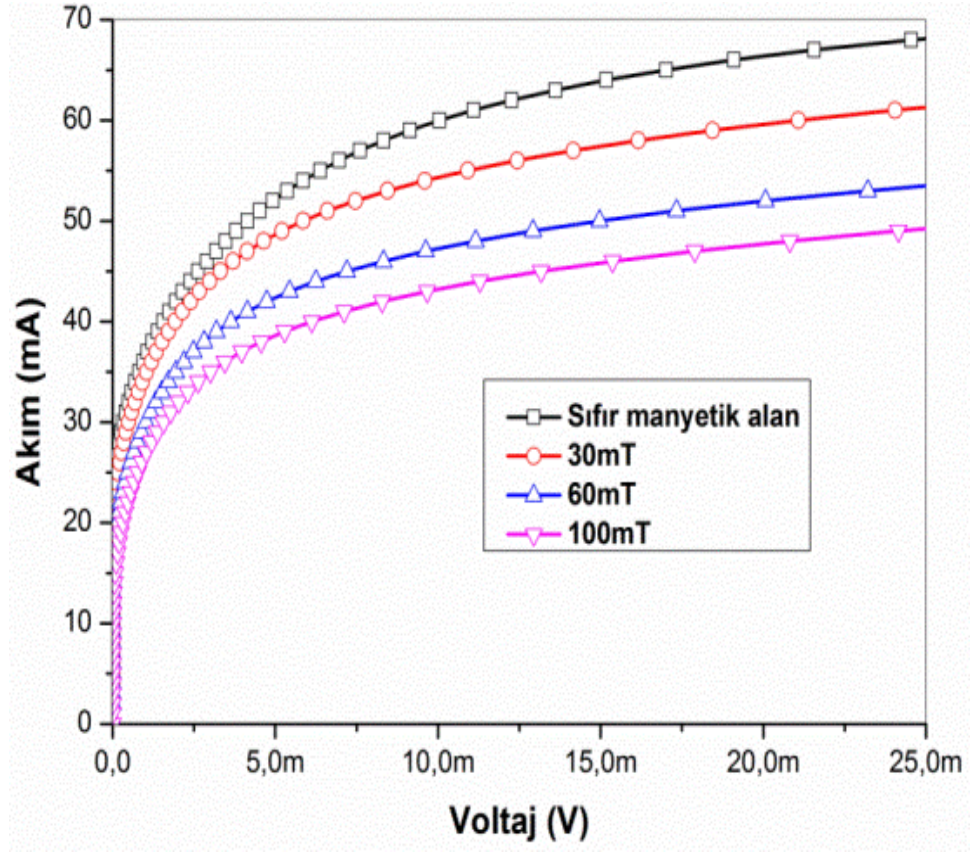
Şekil 15. Tek kat ve çok katmanlı YBCO mikroköprülerin dc direnç – sıcaklık grafikleri.

Alt katmandaki YBCO ince filmin süperiletkenlik özelliklerini test ettikten sonra, üst katmandaki desenlenmiş YBCO mikroköprülerin süperiletkenlik özellikleri dc direnç – sıcaklık (R-T) ölçümü ile test edildi. Aynı işlem tek katman olarak üretilmiş YBCO mikroköprü için de uygulandı ve sonuçlar kıyaslanarak Şekil 15’de gösterilmiştir. Buna göre her iki ölçüm için de (tek katman YBCO mikroköprü, çok katmanlı YBCO mikroköprü) benzer süperiletkenlik faz geçişi elde edilmiştir. Heriki aygıt için de faz geçiş sıcaklıkları 92 K dir. Bu sonuç ile birlikte, üst katmandaki YBCO mikroköprünün, süperiletken YBCO ince filme entegre olmuş çok katmanlı bir süperiletken aygıt olduğunu göstermektedir.

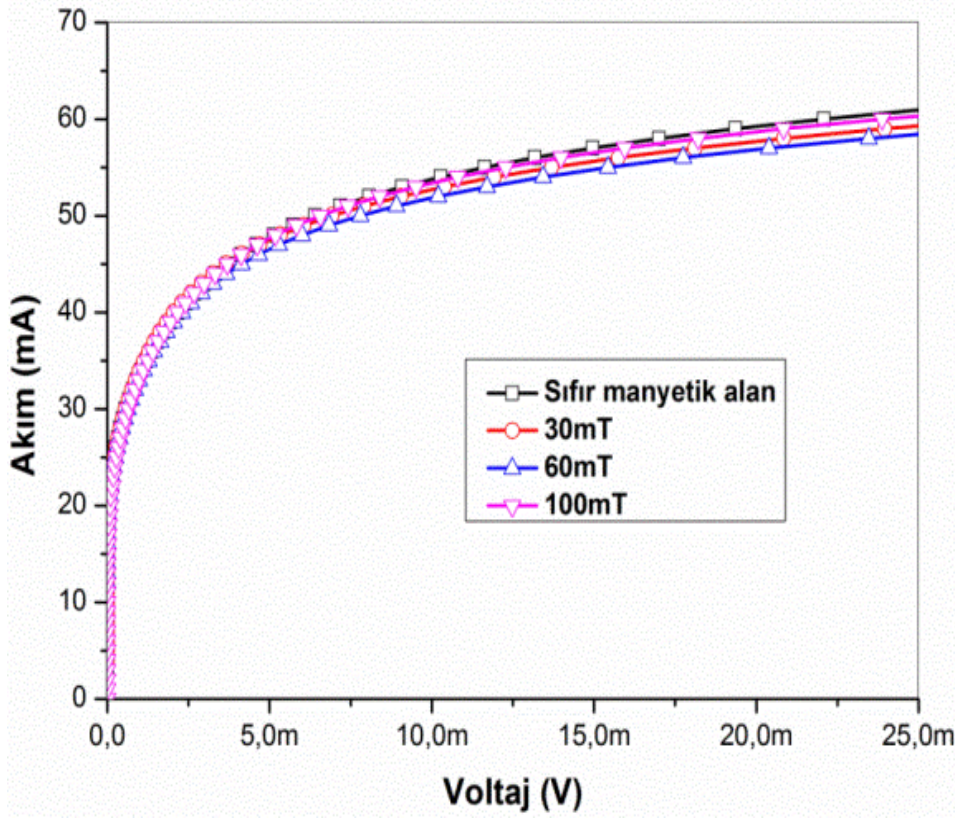
Kritik akımı ve süperiletken YBCO filme entegre edilmiş YBCO mikro aygıtın kritik akım-manyetik alan bağımlılığını test edebilmek için bir takım I-V ölçümleri farklı büyüklüklerde uygulanan manyetik alanlar altında yapıldı.

Şekil 16’da tek katman ve çok katmanlı YBCO mikroköprülerin farklı büyüklüklerde uygulanan manyetik alanlar altındaki I-V grafikleri verilmiştir. Tek katmanlı YBCO aygıt durumunda, I-V grafiğinden elde edilen kritik akım değerinin, uygulanan manyetik alan şiddeti arttırıldıkça azaldığı gözlenmiştir ki

bu beklenen bir sonuçtur. Manyetik alan uygulanmadığında tek katmanlı 20 μm yol genişliğine sahip YBCO aygıt için elde edilen kritik akım değeri 30 mA iken, uygulanan manyetik alan değeri 100 mT'ya kadar arttırıldığında aynı aygıta ait kritik akım değerinin 20 mA' e kadar düştüğü gözlenmiştir (Şekil 16a ve 17). Aynı ölçümler çok katmanlı 20 μm lik YBCO mikro aygıt üzerine uygulanmış ve manyetik alan değeri 100 mT değerine çıktığında bile kritik akım değeri yaklaşık 27 mA mertebesinde sabit kaldığı gözlenmiştir (şekil 16b ve 17).



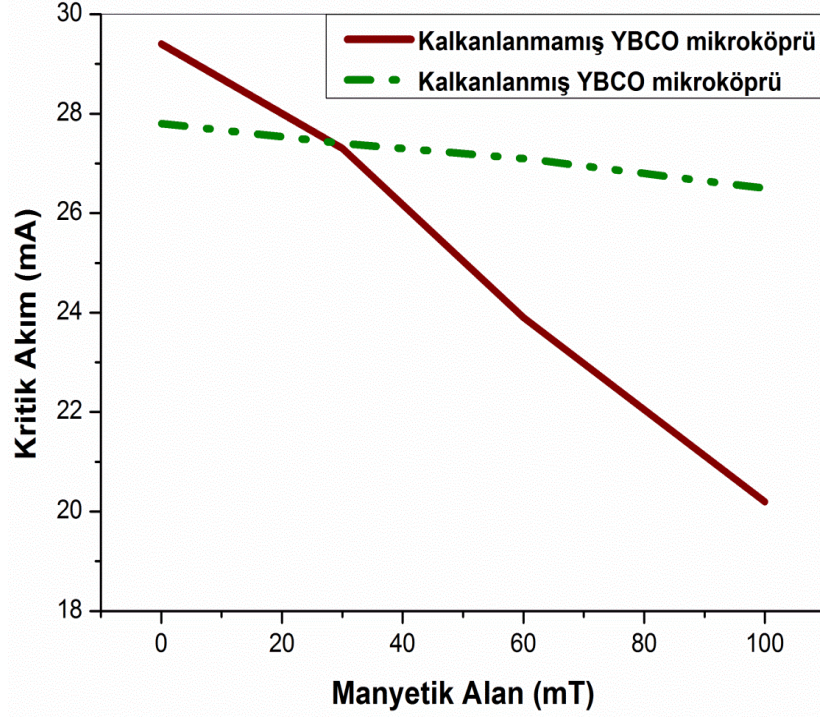
(a)



(b)

Şekil 16. Farklı büyüklüklerde manyetik alan uygulanmış a) tek katlı, b) çok katlı YBCO mikroköprülere ait akım-voltaj karakteristikleri.

Test edilecek örnek vakumlanabilir sıvı azot kryostat içerisinde bulunan bakır uç üzerine monte edildikten sonra sabit mıknatıslar sistemin içerisinde bakır ucun arkasına yerleştirildi ve manyetik alanın örnek yüzeyine dik bir şekilde uygulanması sağlandı. Çip paketleme işleminde yapılan kontak tel bağlantıları örnek üzerine herhangi bir şey yerleştirilmesine engel olmaktadır. Bu sebeple çip bakır uca monte edildikten sonra sabit mıknatıslar sadece çipin arkasına yerleştirilebildi. Bu kısıtlamalar sebebiyle de manyetik alan örnek üzerine yalnız tek bir doğrultudan (dik olarak) uygulandı. Süperiletken YBCO ince film katmanı manyetik kalkan olarak davrandı ve uygulanan alan önemli miktarda dışarılandı. Bu sonuçla birlikte, manyetik kalkanlama işlemi çok katmanlı süperiletken YBCO aygıt uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanıldı ve yüksek sıcaklık süperiletken aygıtların operasyonel kullanışlılığını da arttıran alternatif bir teknik olarak düşünülmesi gerektiği gösterildi.



Şekil 17. Kalkanlanmış ve kalkanlanmamış YBCO mikroköprülerin kritik akımlarının uygulanan manyetik akım altında gösterdiği değişimler.

5. SONUÇLAR

YBCO/STO/YBCO/STO/YBCO çok katmanlı süperiletken YBCO ince film yapısı üretildi ve bu filmlerin elektriksel-manyetik özellikleri test edildi. STO ve YBCO ince filmlerin üretim parametreleri tek katmanlı filmler üzerinden ayrı ayrı optimize edildi ve çok katmanlı yapının üretimi in-situ tekniğine adapte edilerek gerçekleştirildi. Birinci YBCO ince filme ait süperiletkenlik geçiş sıcaklığının, üst katmanlar büyütüldükçe arttığı gözlemlendi. Aynı şekilde orta katmanda bulunan ikinci YBCO ince filmin de kritik sıcaklığı bir üst katman olarak büyütülen ikinci STO katmanı ve en üst YBCO katmanı büyütüldükçe arttığı gözlemlendi. En üst katman olan YBCO ince filmin basit aygıt performansı da aynı zamanda test edildi ve üretimi tamamlanan bu yapının aygıt uygulamalarına olan elverişliliği ve potansiyeli gösterildi. Sonuç olarak bu tez çalışmasında geliştirilen üretim parametreleriyle, yüksek oranda c-ekseni yönelimine sahip çok katmanlı süperiletken YBCO yapısı STO ara katmanlar kullanılarak üretildi. Bu yapıyla

birlikte geliştirilen aygıtların, yüksek sıcaklık süperiletkenleriyle üretilen çok katmanlı aygıtlar arasında tatmin edici özelliklere sahip olduğu gösterildi.

Çok katmanlı yapının geliştirilmesinin ardından bu yapıya ait bir uygulama tasarlanarak 3-katmanlı bir YBCO/STO/YBCO yapısı dizayn edildi. En üst katman süperiletken mikro köprüler şeklinde tasarlandı ve bu aygıt çalıştırılırken alt katmanda bulunan süperiletken YBCO ince film, diyamanyetiklik özelliği kullanılarak manyetik bir kalkan olarak kullanıldı. Bunu test edebilmek için, üst mikroköprünün I-V ölçümü yapılırken dışarıdan sabit manyetik alanlar aygıt üzerine uygulandı ve manyetik kalkan katmanının süperiletken aygıtı dış manyetik alanlardan koruyarak hiçbir manyetik alanın aygıt üzerine etkmediği ve aygıtın kritik akım değerinin 100 mT mertebesine kadar bile korunduğu gözlemlendi.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Balashov, D. and Khabipov, M. I.**, 1999, SINIS Fabrication process for realizing integrated circuits in RSFQ impulse logic, *Supercond. Sci. Technol.*12, 864–867pp.
- Andrianov, V. A.**, 2006, Recombination losses in STJ X-ray detectors with killed electrode, *Institute of Physics Publishing Journal of Physics, Conference Series*, 7th European Conference on Applied Superconductivity, 43 , 1311–1314pp.
- Jiang H.**, 1993, Measurements of anisotropic characteristic lengths in YBCO films at microwave frequencies, *J. Appl. Phys.*,73, 5865-5867p.
- Burnch, F. and Hu, R.**, 1997, A Low- Inductance, Low-Ic HTS Junction Process, *IEEE Trans. on Appl. Supercond* , 7, 2940-2943pp.
- Pettiette-Hall, C. L., Murduck, J. and Burch, J. F.**, 1997, Characterization and Improvement of a YBCO Multilayer Film Process for HTS Circuit Applications, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 12, 2057-2062pp.
- Daly K. P., Murduck, J. M. and Pettiette-Hall C. L.**, 1995, Integration of Step-edge Grain Boundary Josephson Junctions with YBCO Multilayers for Electronics Applications, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 5, 3131-3134pp.
- Cassel, D. and Ortlepp, T.**, 2003, HTS Multilayer Technology for Optimal Bit-Error Rate RSFQ Cells, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 13, 409-412pp.
- Soutome, Y. and Fukazawa, T.**, 2003, A YBCO Multilayer Process Using Surface-Modified Junction Technology, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 13, 591-594pp.
- Pettiette-Hall, C. L., Murduck, J. and Burch, J. F.**, 1999, Electrical and Materials Characterization of a Robust YBCO Multilayer Film Process for HTS Circuit Applications, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 9, 1998-2001pp.
- Chen, K., Chen, M. and Chen, J.**, 2001, Adjustable Multilayer HTS Filters, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* 11, 4010-4013pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Oates, D. E. and Dionne, G. F., 1999, Magnetically tunable superconducting resonators and filters, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 9, 4170-4175pp.

Faley, M. I., Mi, S. B. and Petraru, A., 2006, Multilayer buffer for high-temperature superconductor device on MgO, *Appl. Phys. Lett.*, 89, 1-3pp.

Tian, Y. J., Linzen, S., Shimidl, F. and Seidel, P., 1998, Large-area YBCO films for device fabrication, *Supercond. Sci. Technol.*, 11, 59-62pp.

Mechin, L. and Gerritsma, G. J., 1999, The direct growth of SrTiO₃ (100) layers on silicon (100) substrates; application as a buffer layer for the growth of DyBa₂Cu₃O_{7-x} thin films, *Physica C*, 324, 47-56pp.

Migliuolo, M. and Stamper, A. K., 1989, Single target sputtering of superconducting YBCO thin films on Si (100), *Appl. Phys. Lett.*, 54, 859-861pp.

Boffa, V., Petrisor, T. and Ciontea, L., 1996, Properties of in-situ laser-pulsed deposition YBCO thin films on MgO with STO buffer layers, *Physica C*, 260, 111-116pp.

Hwang, T. J., 2000, Fabrication of YBCO/STO/YBCO multilayer by PLD, *Physica C*, 341-348, 2347-2348pp.

Karmanenkot, S. F. and Belousovs, M. V., 1994, Formation and Raman spectroscopic study of YBCO/STO/YBCO heteroepitaxial structures, *Supercond. Sci. Technol.* 7, 727-733pp.

Afonso, S. and Chan, F.T., 1996, Magnetic field and temperature dependence of critical current densities in multilayer YBa₂Cu₃O₇ films, *J. Appl. Phys.*, 79, 6593-6595pp.

Jang, H. W., 2009, Intermodulation Distortion in Epitaxial Y-Ba-Cu-O Thick Films and Multilayers, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 19, 2855-2858pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Bick, M., Schubert, J., Fardmanesh, M., Panaitov, G., Banzet, M., Zander, W., Hang, Y., and Krause, H. J., 2001, Magnetic field behavior of YBCO step-edge Josephson junctions in rf-washer SQUIDs, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 11, 1339-1342pp.

Katsuno, H., Inoue, S., Nagano, T., and Yoshida, J., 2003, A novel multilayer process for HTS SFQ circuit, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 13, 809-812pp.

Gudoshnikov, S. A., Matveets, L. V., Andreev, K. A., Tishin, A. M., Snigirev, O. V., Mueck, M., Dechert J. and Heiden, C., 1998, Scanning SQUID microscope technique for measurements of ultrathin film magnetic properties, *Appl. Supercond.* 5, 313-317pp.

Avci, I., Algul, B. P., Akram, R., Bozbey, A., Tepe and M., Abukay, D., 2009, Signal performance of DC-SQUIDs with respect to YBCO thin film deposition rate, *Sensors and Actuators A*, 153, 84-88pp.

Nie, J. C., Chen, L., Yang, T., Huang, M. Q., Wu, P. J., Liu G. R. and Li, L., 1997, Sensitive dc-SQUIDs and magnetometers using step-edge junctions, *Physica C*, 282-287, 2477-2478pp.

Seidel, P., Becker, C., Steppke, A., Foerster, T., Wunderlich, S., Grosse, V., Pietzcker, R. and Schmidl, F., 2007, Noise properties of high-temperature superconducting dc-SQUID gradiometers, *Physica C*, 460-462, 331-334pp.

Brake, H. J. M., Wieringa, H. J. and Rogalla, H., 1991, Improvements of the performance of a μ -metal magnetically shielded room by means of active compensation, *Meas. Sci. Technol.*, 596-601pp.

Kim, I. S., Oh, S. H., Kim, K. W., Lee, Y. H., Lee S. G. and Park, Y. K., 2007, Development of a 6-channel High- T_c magnetocardiograph system, *IEEE Appl. Supercond.*, 17, 804-807pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Wiksw, J. P., 1995, SQUID magnetometers for biomagnetism and nondestructive testing: important questions and initial answers, *IEEE Appl. Supercond.*, 5, 74-120pp.

Panaitov, G., Krause, H. J. and Zhang, Y., 2002, Pulsed eddy current transient technique with HTS SQUID magnetometer for non-destructive evaluation, *Physica C*, 372-376, 278-281pp.

Koch, H., 2001, SQUID magnetocardiography: Status and perspectives, *IEEE Appl. Supercond.* 11, 49-59pp.

Zotev, V. S., Matlashov, A. N., Volegov, P. L., Savukov, I. M., Espy, M. A., Mosher, J. C., Gomez, J. J. and Kraus, R. H. 2008, Microtesla MRI of the human brain combined with MEG, *Journal of Magnetic Resonance*, 194, 115-120pp.

Clarke, J. and Braginski, A. I., 2004, The SQUID Handbook: Fundamentals and Technology of SQUIDS and SQUID Systems, vol. 1, Wiley-VCH,.

Bar, L. R., Daalmans, G. M., Barthel, K. H., Ferchland, L., Selent, M., Kühnl M. and Uhl, D., 1996, Single layer and integrated YBCO gradiometer coupled SQUIDS, *Supercond. Sci. Technol.* 9, A87-A91pp.

Drung, D. and Schurig, T., 2003, High- T_c SQUID sensors with integrated earth field compensation. *IEEE Appl. Supercond.* 13, 751-754pp.

Hatsukade, Y., Inaba, T., Maruno Y. and Tanaka, S., 2005, Mobile cryocooler-based SQUID NDE system utilizing active magnetic shielding, *IEEE Appl. Supercond.*,15, 723-728pp.

Terauchi, N., Noguchi, S. and Igarashi, H., 2011, Magnetic shield effect simulation of superconducting film shield covering directly coupled HTS dc-SQUID magnetometer, *Physica C*, 471, 1253–1257pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Hatsukade, Y., Hayashi, K., Takemoto, M. and Tanaka, S., 2009, Determination of the robustness of an HTS SQUID magnetometer covered with a superconducting film shield in an ac magnetic field, *Supercond. Sci. Technol.*, 22, 114010p.

Salamati, H. and Kameli, P., 2004, AC susceptibility study of YBCO thin film and BSCCO bulk superconductors, *J. Magnetism and Magnetic Materials*, 278, 237-243pp.

Müller, K. A. and Shangelaya, A., 2013, Dielectric Enhanced T_c in Underdoped Cuprate, *J. Supercond. Nov. Magn.*, 26, 491-493pp.

Kresin, V. Z. and Wolf, S. A., 2012, Inhomogeneous superconducting state and intrinsic T_c: Near room temperature superconductivity in the cuprates, *J. Supercond. Nov. Magn.*, 25, 175–180pp.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında İzmir' de doğdum. Orta öğrenimimi Nevvar-Salih İşgören Lisesinde tamamladıktan sonra 2007 yılında Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü' ne girdim. Lisans eğitimimi Ağustos 2011' de bitirdikten sonra 2012 Ocak ayı itibari ile Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Anabilim Dalı' nda yüksek lisans programına kabul edildim. Eğitimimi halen bu bölümde sürdürmekteyim.