

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**İNCE FİLM BÜYÜTÜLMESİ İÇİN HALOJEN
ALTTAŞ ISITICISI GELİŞTİRİLMESİ**

Emir ARIK

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa TEPE

Fizik Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 31.01.2019

Bornova-İZMİR

Ocak 2019

Emir ARIK tarafından YÜKSEK LİSANS tezi olarak sunulan “İnce Film Büyütülmesi İçin Halojen Alttaş Isıtıcısı Geliştirilmesi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 31.01.2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

Jüri Başkanı : Dr. Öğr. Üyesi Hakan EPİK

Raportör Üye: Doç. Dr. İlhan ARICI

Üye : Prof. Dr. Mustafa TEPE

İmza





EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi / Doktora Tezi olarak sunduğum “**İnce Film Büyütülmesi İçin Halojen Alttaş Isıtıcısı Geliştirilmesi**” 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.

31/01/2019

İmzası

Adı-Soyadı

Emir Arıç



ÖZET**İNCE FİLM BÜYÜTÜLMESİ İÇİN HALOJEN ALTTAŞ ISITICISI
GELİŞTİRİLMESİ**

Emir ARIK

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa TEPE

Ocak 2019, 45 sayfa

Bu tez çalışmasında, in-situ ince film üretim sistemlerinde kullanılabilir ve reaktif gaz ortamında çalışabilecek yüksek performanslı bir alttaşı ısıtıcısı geliştirilmiştir. YBCO ince film üretiminin, genel olarak ince film üretimi için kullanılan parametrelere kıyasla daha agresif koşullar gerektirmesi nedeniyle, YBCO ince filmler bu ısıtıcının hedef malzemesi olarak seçilmiştir. Bu kapsamda, öncelikli olarak ticari alttaşı ısıtıcıları incelenmiş, bu ısıtıcılarının süperiletken YBCO ince filmler gibi zorlu üretim parametreleri gerektiren in-situ ince film büyütülmesi süreçlerindeki problemleri belirlenmiş ve bu problemlere çözümler sunulmuştur. Üretilebilirlik ve üretim maliyetleri de göz önünde bulundurularak, halojen ışık kaynaklı, kompakt, uzun ömürlü ve yüksek performanslı bir alttaşı ısıtıcısı tasarlanmış ve üretilmiştir. Üretilen alttaşı ısıtıcısı hava atmosferinde, ultra-yüksek vakumda, Argon ve Oksijen gazları akışında, Oksijen atmosferinde ve YBCO ince film büyütülmesi sürecinde test edilmiştir. Test sonuçlarından elde edilen veriler ışığında, bu tez çalışması kapsamında geliştirilen alttaşı ısıtıcısının ultra-yüksek vakum ve oksijen uyumlu, herhangi bir parçacık salınımı yapmayan, uzun ömürlü, kontrollü ısıtılıp soğutulabilen ve istenilen sıcaklıklarda istikrarlı olarak çalışmaya elverişli bir sistem olduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak; bu tez çalışmasında geliştirilen halojen alttaşı ısıtıcısının, süperiletken YBCO ince filmler dahil yüksek sıcaklık ve yüksek performans gerektiren tüm oksit kristal ince film üretim süreçlerinde güvenle kullanılabilir, profesyonel bir sistem elemanı olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Magnetron Sputter, PLD, YBCO İnce Film, Halojen Alttaşı Isıtıcısı.



ABSTRACT**DEVELOPMENT OF HALOGEN SUBSTRATE HEATER FOR
THE GROWTH OF THIN FILMS**

ARIK, Emir

MSc in Physics.

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa TEPE

January 2019, 45 pages

In this thesis, a compact and high performance halogen substrate heater has been developed. This heater is compatible to use in thin film deposition systems particularly highly reactive gas environment for in-situ thin film processing. Since the YBCO thin film deposition needs aggressive process conditions compared to the crystalline thin film deposition in general, it has been chosen as the main thin film process for this heater. In this manner, the commercial substrate heaters have been inspected and the main drawbacks of them in such extreme parameters for in-situ thin film growth like superconductive YBCO thin films have examined, and possible solutions in order to achieve a high performance heater that can handle the needs for those processes have been determined. By keeping the feasibility and production costs in mind, a compact and durable heater has been developed with high heating performance by using a halogen lighting source. This substrate heater has been tested in air, in ultra-high vacuum as well as Argon and Oxygen gas flow and Oxygen atmosphere in order to satisfy the growth process of the YBCO thin film. In the light of this data, it has been shown that the heater developed in this thesis is competitive for ultra-high vacuum thin film systems which does not produce any outgassing. It is also compact which does not need cooling during the process. The temperature controlling is very precise and the heating performance is very high that it can reach the highest temperature (i.e. 1000°C) in seconds.

Keywords: Magnetron Sputter, PLD, YBCO Thin Film, Halogen Substrate Heater.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca tecrübesi ve bilgi birikimi ile yanımda olan ve her konuda bana destek olan tez danışmanım Prof. Dr. Mustafa TEPE'ye çok teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimim sürecinde akademik çalışmalarım ve bilimsel gelişimim konusunda yardım ve rehberlik eden, bu süreçlerde yaşadığım sayısız zorlukta bana 'okun ancak geri çekilerek atılacağı' felsefesini öğreten hocam Doç. Dr. İlbeyi AVCI'ya, laboratuvar arkadaşlarım ve hayat kurtarıcı dostum Özkur KURAN'a, bugüne gelebilmemdeki en büyük pay sahibi olan aileme, manevi desteklerinden dolayı tüm dostlarıma ve 'sevgili yoldaşım'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması 114F165 no'lu TÜBİTAK projesi ve 2017-Fen-049 No'lu Ege Üniversitesi bilimsel araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. İNCE FİLM ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ | 5 |
| 2.1 RF/DC Magnetron Püskürtme Sistemi | 8 |
| 3. ALTTAŞ SICAKLIĞI VE ALTTAŞ ISITICISI TEKNOLOJİLERİ | 12 |
| 3.1 Rezistif Alttaş Isıtıcıları..... | 12 |
| 3.2 Işınımsal Alttaş Isıtıcıları..... | 14 |
| 4. HALOJEN ALTTAŞ ISITICISI GELİŞTİRİLMESİ..... | 16 |
| 4.1 Ana Blok..... | 18 |
| 4.2 Halojen Ampul Bağlantı Elemanları | 21 |
| 4.3 Alttaş Tutucu | 24 |
| 4.4 Alttaş Isıtıcısı – Sistem Ara Bağlantı Elemanı | 27 |
| 4.5 Halojen Alttaş Isıtıcısı | 28 |
| 5. BULGULAR VE TARTIŞMA..... | 29 |
| 5.1 Hava Ortamında Sıcaklık ve Performans Testi | 29 |
| 5.2 Ultra-Yüksek Vakumda Sıcaklık ve Performans Testleri..... | 31 |
| 5.3 Korozyon Testi | 33 |
| 5.4 Süperiletken YBCO Büyütme Süreci | 36 |
| 6. SONUÇ..... | 39 |
| KAYNAKLAR DİZİNİ..... | 41 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 45 |



ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Şekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| <i>Şekil 2.1 Magnetron Püskürtme Sisteminin Şematik Gösterimi: (1) mıknatıs; (2) merkezdekine ters kutuplu mıknatıs; (3) bakır; (4) anot; (5) hedef; (6) aşınan bölge; (7) manyetik alan çizgileri; (8) gaz akışı yönü; (9) alttaş (Drozdov et al., 2015).....</i> | 9 |
| <i>Şekil 2.2 DC magnetron püskürtme yöntemi ile YBCO ince film büyütülme profili</i> | 11 |
| <i>Şekil 3.1 Rezistif Alttaş Isıtıcısı Rezistansları: (a) karbon karbon kompozit; (b) grafit; (c) silisyum karbür; (d) Nikel-Krom (Thermic Edge, 2019)</i> | 13 |
| <i>Şekil 3.2 Alttaş ısıtıcısının tamamının ısındığı sistem</i> | 14 |
| <i>Şekil 3.3 Yansıtıcı yüzey geometrili halojen alttaş ısıtıcısı.....</i> | 15 |
| <i>Şekil 4.1 Ana blok; x ekseninden iki boyutlu ölçekli çizimi</i> | 19 |
| <i>Şekil 4.2 Ana blok; -z ekseninden iki boyutta ölçeklendirilmiş çizimi.....</i> | 19 |
| <i>Şekil 4.3 Ana blok: (a) x ekseninden 3 boyutlu kesit görsel; (b) z ekseninden 3 boyutlu görsel; (c) x ekseninden 3 boyutlu görsel (d) 3 boyutlu tam görsel</i> | 20 |
| <i>Şekil 4.4 Üretilen ana bloğun iç yüzey fotoğrafı.</i> | 20 |
| <i>Şekil 4.5 Ampul bağlantı elemanı; x ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş çizim.....</i> | 21 |
| <i>Şekil 4.6 Ampul bağlantı elemanı; z ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş çizim.....</i> | 22 |
| <i>Şekil 4.7 Ampul bağlantı elemanı, y ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş çizim.....</i> | 23 |
| <i>Şekil 4.8 Ampul Bağlantı Elemanı 3 boyutlu Çizimi: (a) x eksen; (b) y eksen; (c) x-y-z köşe noktası.</i> | 23 |

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

| <u>Şekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| <i>Şekil 4.9 Alttaş tutucu; -z ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş çizim.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Şekil 4.10 Alttaş Tutucu; y ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş resim.</i> | <i>25</i> |
| <i>Şekil 4.11 Alttaş tutucu; x ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş resim.</i> | <i>26</i> |
| <i>Şekil 4.12 Alttaş tutucu: (a); x ekseninden üç boyutlu çizim; (b) y ekseninden üç boyutlu çizim; (c) z ekseninden üç boyutlu çizim; (d) x-y-z köşe noktasından üç boyutlu çizim.</i> | <i>26</i> |
| <i>Şekil 4.13 Halojen Alttaş Isıtıcısı – Sistem Ara Bağlantı Elemanı 3 Boyutlu Görseli.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Şekil 4.14 Halojen alttaş ısıtıcısı montaj şeması.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Şekil 5.1 Hava atmosferinde Sıcaklık-Güç grafiği.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Şekil 5.2 Hava atmosferinde Sıcaklık-Zaman grafiği.....</i> | <i>30</i> |
| <i>Şekil 5.3 Alttaş Tutucunun 857oC’de Işık Kaynağı Kapatıldığındaki Fotoğrafi</i> | <i>30</i> |
| <i>Şekil 5.4 UHV Seviyesinde Sıcaklık-Güç grafiği.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Şekil 5.5 UHV seviyesinde Sıcaklık-Zaman grafiği.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Şekil 5.6 6x10-1 mbar Argon akışında Sıcaklık-Güç grafiği.</i> | <i>32</i> |
| <i>Şekil 5.7 1,6x10-1 mbar Argon akışında Sıcaklık-Zaman grafiği.</i> | <i>33</i> |
| <i>Şekil 5.8 1 mbar Oksijen akışında Sıcaklık-Güç Grafiği</i> | <i>34</i> |
| <i>Şekil 5.9 1 mbar Oksijen akışında Sıcaklık-Zaman grafiği.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Şekil 5.10 700 mbar Oksijen atmosferinde Sıcaklık-Güç Grafiği</i> | <i>35</i> |
| <i>Şekil 5.11 700 mbar Oksijen atmosferinde Sıcaklık-Zaman grafiği.....</i> | <i>35</i> |

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

| <u>Şekil</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| <i>Şekil 5.12 Heater bloğunun maksimum sıcaklığa bağlı korozyon durumu: (a) polisajlanıp hiç kullanılmamış; (b) 10 saat maksimum sıcaklıkta sürekli çalıştıktan sonra; (c) 10 saat maksimumda çalışmanın üzerine 5 kez YBCO ince film üretim süreci tamamlandıktan sonra.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Şekil 5.13 YBCO ince film büyütülme profili.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Şekil 5.14 Halojen alttaş ısıtıcısı kullanılarak UHV Multi-target DC/RF Magnetron Sputter sistemi ile YBCO ince film büyütülürken.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Şekil 5.15 Geliştirilen halojen alttaş ısıtıcısı kullanılarak, magnetron püskürtme yöntemi ile LaAlO₃ (100) alttaş üzerine büyütülen YBCO ince film.....</i> | <i>38</i> |

Çizelgeler

| <u>Çizelge</u> | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| <i>Çizelge 2.1 DC magnetron püskürtme yöntemi ile YBCO ince film büyütülme profili.....</i> | <i>10</i> |
| <i>Çizelge 4.1 Osram HLX 64663 Halojen Kuvars Tip Ampul Özellikleri</i> | <i>17</i> |
| <i>Çizelge 4.2 AISI 310 paslanmaz çelik özellikleri (AISI, 2019)</i> | <i>18</i> |
| <i>Çizelge 4.3 Al₂O₃ termal özellikleri</i> | <i>24</i> |
| <i>Çizelge 5.1 DC magnetron püskürtme yöntemi ile YBCO ince film büyütülme profili.....</i> | <i>37</i> |

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklamaları</u> |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| YBCO | İtriyum Baryum Bakır Oksit |
| LTc | Düşük Sıcaklık Süperiletkeni |
| HTc | Yüksek Sıcaklık Süperiletkeni |
| SQUID | Süperiletken Kuantum Girişim Aygıtı |
| PLD | Darbeli Lazer Biriktirme |
| MBE | Moleküler Işın Epitaksi |
| MOCVD | Metalorganik Kimyasal Buharlaştırma |
| Ar | Argon |
| Ar ⁺ | Argon İyonu |
| O ₂ | Oksijen |
| DC | Doğru Akım |
| LaAlO ₃ | Lantan Aluminat |
| RF | Radyo Frekansı |
| UHV | Ultra-yüksek Vakum |
| SiC | Silisyum Karbür |
| CCC | Karbon Karbon Kompozit |
| NiCr | Nikel-Krom |
| Al ₂ O ₃ | Alumina |
| USD | Amerikan Doları |
| AISI | Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü |
| CNC | Bilgisayarlı Nümerik Kontrol |



1. GİRİŞ

İnce filmler, üzerlerine biriktirileceği alttaş özellikleri ve alttaş sıcaklığına göre amorf, polikristal veya tek kristal olarak büyütülebilir. Amorf bir ince film elde etmek için, ince film büyütülürken alttaş sıcaklığının kristalleşme sıcaklığının altında tutulması yeterlidir (Okunev et al., 1999). Polikristal ince film üretimi için genellikle kuvarz veya Silisyum alttaş/yongalar kullanılır. İnce film üretimi sırasında bu alttaşlar, ince film olarak üretilecek malzemenin kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara kadar ısıtılmalıdır. Böylece, alttaşlar ile uygun kristal örgü parametrelerine sahip olmayan parçacıklar, alttaş üzerinde birbirinden farklı yönelimlere sahip poli kristaller olarak büyür (Iijima et al., 1992). İnce filmlerin epitaksiyel büyütülme süreçlerinde ise ince film olarak büyütülecek malzemenin kristal örgü parametrelerine uygun tek kristal alttaş kullanılmalıdır ve bu alttaş, ince film büyütülmesi sürecinde her malzemenin kendisine özgü olan epitaksiyel büyüme sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklarda tutulmalıdır (Terashima et al., 1988). Epitaksiyel ince film büyütme işlemleri kendi içinde ikiye ayrılır. Bunlar, ince filmin aynı stokiyometride bir tek kristal üzerine büyütülmesi ile yapılan homoepitaksiyel büyüme ve ince filmde farklı bir stokiyometriye sahip, kristal örgü parametreleri ince film olarak elde edilmek istenen malzemenin örgü parametreleri ile benzer değerlere sahip bir başka tek kristal alttaş üzerine büyütülmesi ile oluşan heteroepitaksiyel yapılarıdır (Fukumoto et al., 1989). Epitaksiyel ince film büyütülmesi süreçleri, malzemelerin tek kristal büyüme sıcaklıklarına göre, genellikle yüksek vakumda 400-1000°C arasında değişen sıcaklıklarda yapılmaktadır ve bu süreçlerde alttaş sıcaklığındaki küçük değişimler, üretilen ince filmlerin kristal yönelimi üzerinde büyük değişimlere neden olmaktadır (Weeks and Gilmer, 2007). Bundan dolayı istenilen kristal örgüye ve kristal yönelimine sahip ince filmlerin büyütülebilmesi için alttaş sıcaklıklarının hassas bir şekilde kontrol edilmesi ve istenilen sıcaklıklarda istikrarlı bir şekilde çalışabilmesi gerekir. Kristal ince film büyütülmesi işlemlerindeki bu alttaş sıcaklığı kontrolü ihtiyacından dolayı, in-situ kristal ince film büyütülmesi için tasarlanmış tüm sistemlerde alttaş sıcaklığını, sürecin başından sonuna kadar kontrol edebilecek bir alttaş ısıtıcısı kullanılır (Simon et al., 1988). Sistemlerdeki bu alttaş ısıtıcılarının özellikleri, büyütülmesi hedeflenen ince filmin kristal büyüme sıcaklığı, gerekliyse reaktif gaz kullanımı,

yüksek taban vakum gereksinimleri gibi ince film üretim parametrelerine özel olarak seçilmelidir.

Süperiletken, yarıiletken ve yalıtkan oksit ve metal-oksit poli veya tek kristal yapıda ince filmler oksijen atmosferinde ve yüksek sıcaklık altında üretilmektedir (Yang et al., 2013). Bu filmlerin üretimi esnasında mevcut olan ortam koşulları içerisinde, 800°C'yi bulan sıcaklıklarda Oksijen gazı kullanımı gereksiniminden dolayı, alttaş ısıtıcılarını mekanik olarak en zorlayıcı parametreler, süperiletken $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) ince filmlerin üretiminde kullanılmaktadır (Marré et al., 1998). Bu parametrelerden vakum, alttaş sıcaklığı, soy ve reaktif gaz karışımları, ince film kaplama hızı gibi başlıca in-situ üretim parametrelerinin tamamı, YBCO'nun süperiletkenlik özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir ve bu parametreler üzerindeki küçük farklılıklar, bu özellikler üzerinde çeşitli değişiklikler ve sapmalara neden olabilmektedir (Wang et al., 1996). İnce film üretim teknolojilerinde taban vakum, gaz basınçları, kaplama hızı gibi üretim parametreleri, profesyonel sistemler ile hassas bir şekilde, kontrol edilebilmektedir. Bu süreçte alttaş sıcaklıkları, ışınımsal alttaş ısıtıcısı teknolojileri temelli, yüksek enerjili halojen, kızılötesi veya lazer ışık kaynağı kullanılarak ısı enerjisi elde edilen, yüksek sıcaklıklarda Oksijen ve ultra-yüksek vakum (UHV) uyumlu ticari alttaş ısıtıcıları ile hassas bir şekilde kontrol edilebilmekte ve bu sayede istenilen özelliklere sahip ince filmler elde edilebilmektedir (Clark et al., 1997). Bu tip alttaş ısıtıcıları, yüksek teknoloji ürünleri olup, bu teknolojiye sahip alttaş ısıtıcılarının fiyatları ortalama 40.000\$ gibi, birçok araştırmacının proje bütçelerine oranla çok yüksek fiyatlara satılmaktadır. YBCO gibi, üretimi Oksijen atmosferinde 800°C gibi yüksek alttaş sıcaklıkları gerektiren süreçlerde, görece uygun fiyatlı ticari alttaş ısıtıcıları genelde rezistans çekirdekli sistemler olup, hem üretim teknolojileri hem de üretimde kullanılan metal alaşımların yüksek sıcaklıklardaki düşük korozyon dirençleri nedeniyle büyük oranda korozyona uğramaktadır. Buna bağlı olarak bu alttaş ısıtıcıları hem vakum odacığına parçacık salınımı yapmakta, hem de zamanla sıcaklık performansları düşmekte ve işlevlerini tamamen yitirmektedirler. Bu nedenle kristal ince filmlerin büyütülmesi için alttaş ısıtıcıları teknolojileri alanında ticari ışınımsal alttaş ısıtıcılarına göre daha

uygun fiyatlara temin edilebilecek, yüksek performanslı, yüksek sıcaklıklarda UHV ve Oksijen uyumlu bir alttaş ısıtıcısı geliştirilmesi önem arz etmektedir.

YBCO ince filmler, 1990'lı yıllardan beri süperiletken elektroniği teknolojilerinde ağırlıklı olarak çalışılmakta olup, yapısal ve elektronik özelliklerinden dolayı diğer yüksek sıcaklık süperiletkenlerine ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ -BSCCO, $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ -TBCCO, vb.) oranla daha fazla tercih edilmektedir (Cole et al., 1992). Bu yüksek sıcaklık süperiletkenleri arasında görece daha basit kristal yapısı ve neredeyse standartlaşmış üretim parametleri avantajlarından dolayı aygıt yapmaya daha uygun olduğundan, özellikle Josephson eklemi (Josephson Junction) ve süperiletken kuantum girişim aygıtları (SQUIDS) uygulamaları için YBCO süperiletkeni tercih edilmektedir (Gross et al., 1990). Süperiletken YBCO ince filmlerin uygun kristal yapıda ve kontrollü üretimi için magnetron püskürtme, darbeleri lazer biriktirme (Pulsed Laser Deposition –PLD) gibi sistemler kullanılmakta ve ince filmler bu sistemlere entegre edilen alttaş ısıtıcıları ile in-situ yapılmaktadır (Roas et al., 1988).

YBCO ince filmlerin in-situ üretimleri ultra-yüksek taban (baz) vakumda ve 800°C 'yi bulan yüksek sıcaklıklarda Oksijen gazı ortamında yapılmaktadır. İnce film büyütme işlemleri, özellikle püskürtme sisteminde iyonlar tarafından, YBCO hedef malzemedeki aşındırılan moleküllerin alttaş üzerine angström mertebesinde biriktirilmesi ile yapıldığından, bu sürecin gerçekleştiği vakum odacığına yabancı atom veya kirlilik, üretilen ince filmlerin parametreleri üzerinde çeşitli olumsuz etkilere yol açmaktadır (Gupta et al., 1992). Alttaş ısıtıcıları haricinde, ince film üretim sistemlerinin diğer parça ve ekipmanları oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda çalıştığı sürece reaktif gaz ortamında herhangi bir deformasyona uğramadan işlevlerini sorunsuzca yerine getirebilmektedir. Ticari alttaş ısıtıcıları bütün bir blok şeklinde üretildiklerinden dolayı, yüksek alttaş sıcaklığı gerektiren işlemlerde bu sistem yalnızca alttaş tutucu kısmı değil, tüm ısıtıcı bloğu ısıtacaktır (Estler et al., 1991). Bu durum hem alttaş ısıtıcısının Oksijen atmosferinde korozyona uğrayabilecek kısımlarına, hem de contalar, plastik gaz bağlantı boruları, vakum pompası gibi

sistem elemanlarına zarar verir. Bundan dolayı hemen hemen tüm ticari alttaş ısıtıcıları, alttaş ısıtıcı bloğunun ısınmasını önlemek için bir takım soğutma ekipmanları ile birlikte kullanılmalıdır. Bu durum, hem soğutma sistemleri için fazladan maliyete, hem de vakum odacığına ekstra soğutma sistemi parçalarının girmesine yol açar. Bu kapsamda, tüm bu ekstra maliyet giderlerinin ve ekipman kullanımının önüne geçilebilmesi için bu tez çalışması kapsamında geliştirilen alttaş ısıtıcısı bütün bir blok şeklinde değil, halojen kaynaktan çıkan fotonların, blok içerisinde geometrisi özel olarak seçilmiş yansıtıcı bir yüzey ile alttaş tutucuya odaklanılarak, yalnızca bu parçanın ısınması sağlanacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece ışık kaynağından elde edilen maksimum verimliliğin yanı sıra; hem alttaş ısıtıcısı sisteminde bir soğutma ekipmanı kullanımı gereksinimi ortadan kalkmış, hem de diğer sistem elemanları yüksek sıcaklıklardan korunmuştur.

Bu tez çalışmasında, bütün bu durumlar göz önüne alınarak YBCO ince film üretiminde kullanıma uygun bir halojen alttaş ısıtıcısı tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu alttaş ısıtıcısı, magnetron püskürtme yöntemi ile YBCO ince film üretim şartları uygulanarak uzun süreler boyunca test edilmiş ve yapılan performans testleri sonucunda, geliştirilen alttaş ısıtıcısının ultra-yüksek taban vakumda ve yüksek sıcaklıkta, yoğun Oksijen akışında veya Oksijen atmosferinde vakum odacığına herhangi bir parçacık salınımı yapmadan ve hiçbir korozyona uğramadan, kontrollü ve istikrarlı bir şekilde çalıştığı gösterilmiştir. Bu sistem, alttaş ısıtıcısı kullanılan tüm ince film üretim sistemlerinde dahili olarak bulunan bir alttaş ısıtıcısı elektriksel güç kaynağı ve bir thermocouple haricinde hiçbir ekstra ekipmana ihtiyaç duymamaktadır. Ayrıca geliştirilen bu alttaş ısıtıcısı, olası herhangi bir bozulmada kolaylıkla onarılabilir şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede, sistemde zaman içerisinde bozulması olası tek parça olan halojen ışık kaynağı, çok uygun bir fiyata satın alınabilir ve kolaylıkla değiştirilebilir.

2. İNCE FİLM ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

İnce film büyütülmesi için kullanılan başlıca yöntemler; termal buharlaştırma, elektron demeti buharlaştırma, metalorganik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD), moleküler ışın epitaksi (MBE), darbeli lazer biriktirme (PLD) ve magnetron püskürtme yöntemleridir (Berberich et al., 1993; Lorenz et al., 1995; Madakson et al., 1988).

Termal buharlaştırma yöntemi, ince film üretim teknolojilerinde kullanılan en yaygın ve eski metotlardan birisidir. Genellikle kaplaması yapılacak olan materyal, sıcaklığı kontrol edilebilir bir yüzey/pota üzerine yerleştirilir ve sıcaklık kontrollü olarak artırılır (Berberich et al., 1994). Buharlaştırılacak materyalin kaynama sıcaklığının düşürülmesi için bu işlem genellikle yüksek vakum altında uygulanır. Örneğin oda sıcaklığında $\sim 2400^{\circ}\text{C}$ 'de buharlaşan alüminyum ultra-yüksek vakumda $\sim 800^{\circ}\text{C}$ 'de buharlaşabilmektedir. Bu yöntemde gaz fazındaki materyal belirli bir yönelime sahip olmadığı için tüm sistem içerisine kaplanır. Kaplamanın belirli bir stokiyometride olması istendiği durumlarda alttaşın ısıtılması gerekmektedir. Buharlaştırma işleminin kısa sürede yapıldığı durumlarda alttaşın hızlı bir şekilde ısınması ve soğuması büyük önem taşımaktadır. Özellikle birden fazla malzemenin aynı anda buharlaştırıldığı durumlarda farklı malzemelerin de birbiriyle etkileşime girebilmesi için gerekli olan enerji alttaş tarafından sağlanır (Lathrop et al., 1987). Tüm bu gereksinimlerden dolayı bu sistemlerde kullanıma uygun alttaş ısıtıcıları; kontrollü ve hızlı bir şekilde ısınıp soğuyabilen, yüksek sıcaklıklarda ultra-yüksek vakum ve reaktif gaz uyumlu ve kompakt bir yapıda olmalıdır.

Elektron demeti ile fiziksel buhar biriktirme (Electron Beam-Physical Vapor Deposition) yöntemi de diğer fiziksel buhar biriktirme yöntemleri gibi yüklü parçacıkların yönlendirilip hedef malzemeye çarpışmasını ve oradan atom/molekül düzeyinde parçalar koparması temeline dayanmaktadır (Kington et al., 1989). Diğer yöntemlerden farklı olarak, burada yüklü parçacıkların kaynağı yüklü bir ışık kaynağından (tungsten filamanı lamba gibi) çıkan yüklü elektronlardır. Hedef malzemedan kopan atomlar/moleküller sahip oldukları enerji ile sistem içerisinde her yere saçılmaktadırlar. Ancak epitaksiyel büyüme için tutundukları yüzeyin (alttaş), ince film olarak elde edilecek malzemenin epitaksiyel büyüme sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa sahip olması

gerekmektedir. Bu yöntemde fiziksel biriktirme esnasında alttaşın sıcaklığındaki değişimler anlık olarak büyümenin yönelimini ya da kristal yapısını değiştirebilmektedir (Jiang et al., 1994). Bundan dolayı bu yöntemde alttaş sıcaklığını kontrol eden ısıtıcıların yüksek sıcaklıklarda ultra-yüksek vakum ve reaktif gaz uyumlu olma gereksinimlerine ek olarak, istenilen sıcaklıklarda herhangi bir salınım yapmadan, istikrarlı bir şekilde çalışabilmesi önemlidir.

Metalorganik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) yönteminde, uygun sıcaklığa kadar ısıtılan alttaş üzerinden gerekli reaktif gazlar geçirilir ve alttaş üzerinde çok ince bir tabaka halinde kaplanır. Daha sonra ince film formunda elde edilmesi hedeflenen elementler, kimyasal yöntemler ile uygun stokiometride buharlaştırılır ve bu buhar, kaplama odasına aktarılır. Kaplama odasında alttaş üzerine kaplanan reaktif gaz ile aktarılan buhar kimyasal tepkimeye girerek ince filmi oluşturur (Hirai and Yamane, 1991). Bu yöntem ile üretilen ince filmler homojenlik, safsızlık ve morfolojik özellikler yönünden oldukça başarılıdır.

Moleküler ışın epitaksi (MBE) yönteminde vakum odacığında ince film formunda elde edilmesi hedeflenen bileşiğin her bir elementine ait farklı bir hedef bulunur. İnce film büyütülmesi aşamasında tüm bu hedeflerden fiziksel yöntemler ile buharlaştırılan parçacıklar alttaş üzerine biriktirilir. Bu yöntemde çok yüksek vakum seviyeleri ($\sim 1.10^{-6}$ mbar) gereklidir. Bu yüzden MOCVD yönteminde olduğu gibi alttaş yüzeyine önceden ince bir tabaka halinde reaktif gaz biriktirilir (Gupta and Hussey, 1991). Bu yöntem ile epitaksiyel olarak mükemmel yapıda filmler büyütülür. Bu yöntemde alttaş sıcaklığının kontrolünü sağlayan alttaş ısıtıcıları, her ne kadar reaktif gazlara maruz kalmayacak olsa da, sistemsel bir gereksinim olan ultra-yüksek vakuma uyumlu, vakum ortamına herhangi bir parçacık salınımı yapmayan, yüksek performanslı ve ısınma ve soğuma süreçlerini kontrollü bir şekilde gerçekleştirebilecek özelliklerde olmalıdır.

Darbeli lazer biriktirme (PLD) yönteminde temel olarak bir vakum odacığında ince film formunda elde edilmek istenen bileşikten oluşan bir hedef malzeme, üzerine ince film kaplanacak alttaş, gerekli alttaş sıcaklığı sürecini uygulayacak bir alttaş ısıtıcısı, vakum elemanları ve gaz girişleri bulunur. Bu

yöntemde, vakum odasının dışında bulunan bir kaynaktan çıkan yüksek enerjili lazer ışını bir pencereden hedefe odaklanır ve belirli frekansta hedef üzerine gönderilen ışın demetleri ile hedeften parçacıklar kopartılır. Hedeften kopartılan bu parçacıklar, vakum odasına verilen reaktif gaz ile tepkimeye girerek alttaş üzerine biriktirilir. Bu yöntemde film kalınlığı, hedefe uygulanan lazerin gücü ve frekansı ve toplam biriktirme süresi ile belirlenir. Yüksek vakumda yapılan biriktirme işleminden dolayı safsızlık oldukça yüksek seviyelerdedir. Bundan dolayı bu sistemlerde alttaş sıcaklığını kontrol eden ısıtıcılar yüksek sıcaklıklarda ultra-yüksek vakum ve reaktif gaz uyumlu çalışabilen ve bu şartlar altında herhangi bir parçacık salınımı yapmayan özelliklerde olmalıdır. Bu yöntemde elde edilmesi hedeflenen ince filmlerin morfolojik özellikleri yüksek hassasiyet ile kontrol edilebilmektedir (Watanabe et al., 2005). Tüm bu avantajlarından dolayı PLD tekniği, günümüzde in-situ ince film büyütme işlemleri için sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisidir.

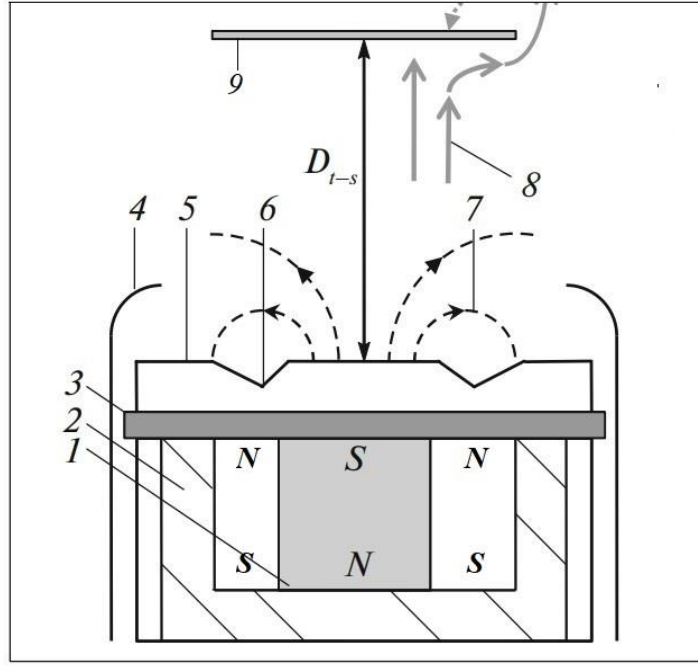
Magnetron püskürtme sisteminde ince film olarak elde edilmek istenen bileşik ile aynı stokiyometriye sahip bir hedef ve bu hedefin arkasında uygun geometrili bir magnetron sistemi, gaz girişleri, vakum elemanları bağlantıları ve alttaş ısıtıcısı ekipmanlarının tamamı vakum odasında bulunur. Bu sayede sistem, hiçbir dış etkiye ihtiyaç duymadan, tam bir in-situ büyütme yapabilmeye elverişlidir. Püskürtme yöntemi, elektrik alan altında hızlandırılan yüksek enerjili Ar^+ iyonlarının manyetik alan altında hedef malzemeye yönlendirilmesiyle hedef malzemenin moleküler boyutlarda aşındırılması temeline dayanır. Aşındırılan bu parçacıklar, gerekli durumlarda vakum odacığına verilen reaktif gaz ile de tepkimeye girerek alttaş ısıtıcısı ile uygun sıcaklığa getirilmiş alttaş üzerine biriktirilir (Schurig et al., 1996). Ar^+ iyonları ve elektronlar tarafından atomik boyutlarda ve homojen olarak aşındırılan hedef malzemedan kopan parçacıklar, ultra-yüksek baz vakumda kontrol edilen reaktif gaz akışı altında bu gaz atomları ile bileşik oluşturarak alttaş üzerine birikmektedir. Bundan dolayı magnetron püskürtme yönteminde, yüksek hassasiyet ile kontrol edilen üretim parametrelerinin bir sonucu olarak istenilen karakteristik özelliklere sahip ince filmler başarıyla büyütülebilmektedir. Bu süreçte, büyütülen ince filmlerin özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip başlıca parametrelerinden birisi alttaş sıcaklığıdır. Bundan dolayı bu

sistemlerde; yüksek sıcaklık, ultra-yüksek vakum, reaktif gaz akışı ve reaktif gaz atmosferi gibi zorlayıcı ortam koşullarında, alttaş sıcaklığının hassas bir şekilde kontrolünü sağlayabilecek alttaş ısıtıcıları kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında ince film büyütülmesi için magnetron püskürtme sistemi kullanılmış olup, bu sistemin detayları bir sonraki başlık altında verilmiştir.

2.1 RF/DC Magnetron Püskürtme Sistemi

Magnetron püskürtme yönteminde, püskürtme sisteminin vakum odasına verilen Argon (Ar) gazı atomları, iletken hedef (katot) ile hedef önündeki bir anot arasına uygulanan elektrik alan altında iyonlaşır (Ar^+) ve bu şekilde Ar^+ plazması oluşur. Elektrik alan altında hedef malzemeye doğru ivmelenen yüksek enerjili Ar^+ iyonlarının etkisi ile hedeften moleküler boyutta parçacıklar kopartılır ve bu parçacıklar bir alttaş üzerine biriktirilir. Bu tez çalışmasında YBCO ince film büyütülmesi için DC magnetron püskürtme yöntemi kullanılmıştır. DC magnetron püskürtme sisteminde başlık (source) içerisinde bulunan hedefin arkasında bir tane merkezde ve merkezin etrafında çember geometrisinde dizili, merkezdekine ters kutuplu kuvvetli mıknatıslar bulunur. Argon gazının iyonlaşması sırasında açığa çıkan elektronlar ve Ar^+ iyonlarının hedefe çarpması sonucu açığa çıkan ikincil elektronlar bu mıknatısların oluşturduğu manyetik alan sayesinde hedef yüzeyinin belli bölgelerinde tuzaklanır. Oluşan manyetik alan boyunca yoğunlaşan yüksek hızlı elektronlar, Ar atomları ile çarpışarak enerjilerini aktarır ve böylece Ar atomlarını iyonlaştırarak bu bölgede Ar^+ yoğunluğunun artmasını sağlar. Böylece püskürtme oranı ve buna bağlı olarak alttaş üzerine parçacık yığılma oranı artar, daha düşük bir DC voltaj altında kaplama işlemi yapılabilir ve iyonlar hedef malzeme yüzeyini manyetik alan boyunca homojen olarak aşındırır (Kelly and Arnell, 2000). Magnetron püskürtme yöntemi ile ince film büyütülmesi sürecinde, büyütülen ince filmin süperiletkenlik özellikleri üzerinde doğrudan etkisi olan ve büyük bir hassasiyet ile kontrol edilmesi gereken birtakım parametreler vardır. Bu parametrelerden başlıcaları; taban vakum seviyesi, vakum odasındaki gaz basınçları, uygun alttaş seçimi, uygun DC voltaj seçimi, hedefe göre uygun alttaş konumu ve alttaş sıcaklığı olarak verilebilir. Magnetron püskürtme sistemi Şekil 2.1'de şematize edilmiştir.



Şekil 2.1 Magnetron Püskürtme Sisteminin Şematik Gösterimi: (1) mıknatıs; (2) merkezde ters kutuplu mıknatıs; (3) bakır; (4) anot; (5) hedef; (6) aşınan bölge; (7) manyetik alan çizgileri; (8) gaz akışı yönü; (9) alttaş (Drozdov et al., 2015).

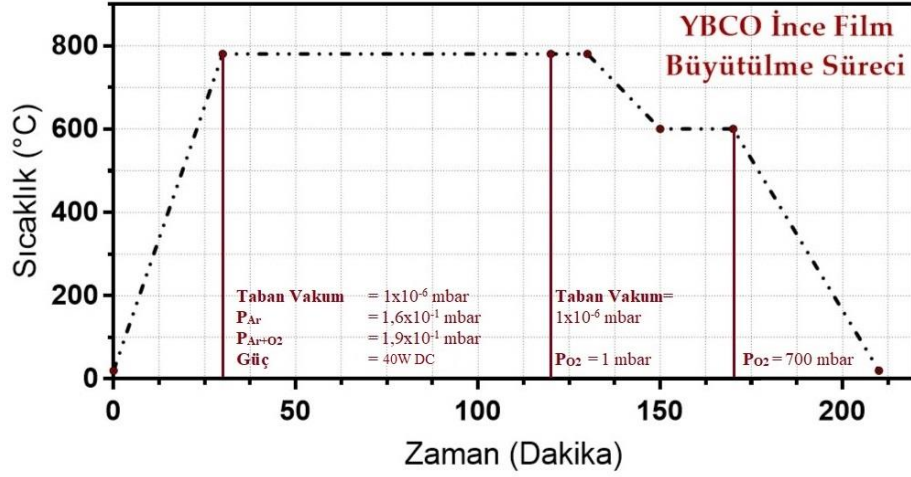
Bu yöntem ile ince film kaplama sürecinde ilk etapta, kaplanmak istenen ince filmin kristal örgü paramaterelerine uygun bir alttaş seçilir, bu alttaş, alttaş ısıtıcısı üzerine sabitlenir, sistem kapatılır ve vakuma alınır. Sistem 1×10^{-6} mbar taban vakum seviyesine turbomoleküler pompa ile getirilir ve bu aşamada alttaş ısıtıcısı çalıştırılır. Alttaş sıcaklığı istenilen seviyeye geldiğinde plazmayı oluşturmak üzere Argon gazı ve elde edilmek istenen bileşik stokiyometrisi için gerekli ise reaktif gaz verilir ve bu durumda alttaş sıcaklığı gaz ortamında stabil hale gelene kadar beklenir. Bir diğer önemli husus olan hedef ile alttaş arası mesafe, sistemin mekanik yapısına göre sistem vakuma alınmadan önce veya bir dış kontrol ekipmanı ile sistem kapalıyken ayarlanabilir. Tüm bu parametreler, istenilen duruma getirildikten sonra başlıkta bulunan bir anot ile katot arasında DC voltaj uygulanır ve bu voltaj altında Argon gazı iyonlaştırılarak plazma oluşturulur. Bu aşamada artık elektrik alan ve hedefin arkasındaki mıknatısların manyetik alanı altında yönlendirilen yüksek enerjili Argon iyonlarının ve elektronların hedefi bombardıman etmesi ile püskürtme işlemi başlamış olur (Poppe et al., 1988). Magnetron püskürtme veya diğer in-situ ince film üretim tekniklerinde tüm bu parametrelerin sorunsuz ve büyük hassasiyet ile kontrol edilebilmesine karşın, YBCO gibi agresif üretim koşulları gerektiren oksit kristal

ince film kaplama süreçlerinde, alttaş sıcaklığının kontrolü konusunda bir takım problemler ile karşılaşmaktadır.

YBCO ince film büyütülmesi süreçlerinde alttaş sıcaklığı, c eksenli yönelimli tek kristal yapının oluşumu ve malzemenin yeterince oksijen alıp uygun stokiyostride birikmesini sağlayabilmek için oldukça önemlidir. Bu iki parametre, YBCO'nun süperiletkenlik özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir ve elde edilmek istenen ince filmin belirli özelliklere sahip olması için hassas bir şekilde kontrol edilmesi gereklidir. Literatürde magnetron püskürtme yöntemi ile YBCO ince film büyütülürken kullanılan parametreler genellikle benzer olup, sisteme özgü küçük farklılıklar dışında bu parametreler standartlaşmış durumdadır. Belirlenen bu parametreler, Çizelge 2.1 ve Şekil 2.2 ile gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 DC magnetron püskürtme yöntemi ile YBCO ince film büyütülme profili

| YBCO Büyütülme Profili | |
|---------------------------------|---------------------------|
| Güç | 40 W DC |
| Alttaş Sıcaklığı | 780°C |
| Taban Vakum | 1×10^{-6} mbar |
| P_{Ar} | $1,6 \times 10^{-1}$ mbar |
| P_{Ar+O2} | $1,9 \times 10^{-1}$ mbar |
| Depozisyon Süresi | 90 dakika |
| Oksidasyon Profili | |
| Süre (780°C) | 10 dakika |
| P_{O2} Akışı | 1 mbar |
| Süre (780°C-600°C) | 20 dakika |
| P_{O2} Atmosferi | 700 mbar |



Şekil 2.2 DC magnetron püskürtme yöntemi ile YBCO ince film büyütülme profili

DC magnetron püskürtme yöntemi ile süperiletken YBCO ince film büyütülmesinde $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ stokiyometrisinde bu bileşiğin süperiletkenlik koşullarından olan " $0 \leq x \leq 0.5$ " değerini elde edebilmek için vakum odacığında Argon ile birlikte Oksijen akışı olmalıdır (Manthiram et al., 1987). Ayrıca hedeften püskürtülen parçacıkların alttaş üzerinde c eksenine yönelimli tek kristal yapıda büyütülebilmesi için bu süreçte alttaşın 780°C sıcaklıkta istikrarlı olarak tutulması gerekmektedir. İnce film üretim sürecinin devamında, $780-600^\circ\text{C}$ arası sıcaklıklarda vakum odasında alttaş üzerine 1 mbar oksijen akışı uygulanır. Daha sonra ise 600°C sıcaklıktan oda sıcaklığına kadar vakum odası 700 mbar Oksijen ile doldurulur (Low et al., 1997). Tüm bu ultra-yüksek taban vakum ve Oksijen atmosferindeki yüksek sıcaklık gerektiren işlemlere uygun alttaş ısıtıcıları çok pahalıdır (ortalama 40.000\$) ve soğutma sistemi kullanımı gerektirmektedir. Görece daha uygun fiyatlı alttaş ısıtıcılarında ise metal aksamlar içeren veya bu alttaş ısıtıcılarının ısı kaynağı olan direnç elemanlarında oksitlenmeye bağlı korozyonlar meydana gelmektedir. Bundan dolayı bu alttaş ısıtıcıları vakum odasına parçacık salınımı yapmakta, performansları zamanla düşmekte ve bir süre sonra çalışmaz hale gelmektedir. Bu problemlere bir çözüm olarak, bu tez çalışmasında yüksek sıcaklıklarda UHV ve Oksijen uyumlu, yüksek performanslı, güç kaynağı haricinde ekipman kullanımı gerektirmeyen, vakum odacığına herhangi bir parçacık salınımı yapmayan ve uygun fiyatlara elde edilebilecek, profesyonel ve kompakt bir halojen alttaş ısıtıcısı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu alttaş ısıtıcısı, Şekil 2.1 ile verilen YBCO ince film üretim parametreleri ile test edilmiş ve test sonuçları ileriki başlıklar altında verilmiştir.

3. ALTTAŞ SICAKLIĞI VE ALTTAŞ ISITICISI TEKNOLOJİLERİ

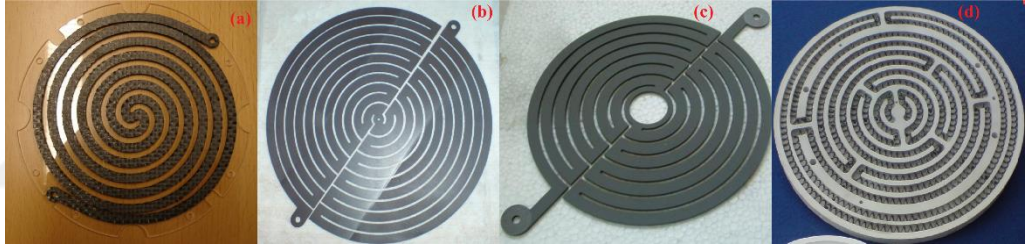
Kristal ince film üretim parametreleri, bu ince filmlerden üretilecek aygıt ve sensörlerin performansları üzerinde kritik etkilere sahiptir. Bundan dolayı, ileri teknolojilerde kullanılması hedeflenen aygıt ve sensörlerin üretileceği ince filmlerin istenilen özelliklere sahip olabilmesi için hassas ve kontrollü bir şekilde büyütülmesi gerekmektedir. Taban vakum, gaz basınçları, alttaş sıcaklığı, ince film kaplama hızı, ince film kalınlığı gibi başlıca ince film üretim parametrelerinin tamamının aynı anda ve hassas bir şekilde kontrol edilebilmesinden dolayı, teknolojik uygulamalarda kullanıma uygun kristal ince filmlerin büyütülmesinde in-situ yöntemler tercih edilmektedir (Foley et al., 1999). Magnetron püskürtme ve PLD gibi dünyada yaygın olarak kullanılan başlıca in-situ ince film büyütülmesi yöntemlerinde, vakum, gaz basınçları, film kaplama hızı ve film kalınlıkları sorunsuz ve son derece hassas şekilde kontrol edilebilmekte, fakat yüksek sıcaklıklarda ve yüksek vakumda reaktif gaz kullanımı gerektiren süreçlerde, alttaş sıcaklığı kontrolünde çeşitli problemler yaşanmaktadır.

Üst başlıklarda bahsedilen, kristal ince filmlerin üretimindeki zorlu koşullar ile baş edebilecek alttaş ısıtıcı geliştirilmesi araştırmaları genel olarak dünya çapında bu iş üzerine profesyonelleşmiş firmalar tarafından uzun yıllardır yapılmaktadır. Bu süreç içerisinde başlıca iki tip alttaş ısıtıcı üzerine yoğunlaşmıştır. Bunlardan ilki, tarihi in-situ kristal ince film üretim teknolojilerinin başlangıcına dayanan rezistif alttaş ısıtıcıları, ikincisi ise gelişen teknoloji ve malzeme biliminin bir ürünü olan ışınımsal alttaş ısıtıcılarıdır.

3.1 Rezistif Alttaş Isıtıcıları

Rezistif alttaş ısıtıcıları, 1900'lü yılların son döneminde gelişen kristal ince film üretim teknolojilerinin doğurduğu alttaş ısıtıcısı ihtiyacından ortaya çıkmıştır. Rezistif alttaş ısıtıcılarının çalışma prensibi; bir direnç elemanı üzerinden yüksek akım geçirilerek elde edilen ısı enerjisinin, fiziksel temas ile alttaşın sabitlendiği yüzeye aktarılmasına dayanır. Bu yöntem temelinde üretilen alttaş ısıtıcılarında direnç elemanı olarak kullanılan malzemenin, yüksek sıcaklık gerektiren ince film büyütülmesi süreçlerinde 1000°C'yi geçen sıcaklıklara ulaşması gerekir (Berkley et al., 1988). Ultra-yüksek vakumda ve reaktif gaz

akışı altında 1000°C üzerindeki sıcaklıklara ulaşan direnç elemanları, kısa sürede korozyona uğrayıp deforme oldukları için bir süre sonra işlevini yitirmekte, bu yüzden de bu tip alttaş ısıtıcıları kısa ömürlü olmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda reaktif gazlar ile tepkimeye giren bu direnç elemanları, moleküler boyutlarda yapılan ince film büyütülmesi sürecinde ortama parçacık salınımı yaptıkları için üretilen ince filmin safsızlığını da negatif yönde etkilerler (Brüll et al., 1991). Zaman içerisinde gelişen malzeme ve üretim teknolojilerinin etkisi ile bu problemlerin önüne geçilebilmek adına direnç elemanı olarak rezistif alttaş ısıtıcılarında kullanıma uygun geometrik şekilleri ile görselleri Şekil 3.1 ile verilen Grafit, Silikon Karbür (SiC), Karbon Karbon Kompozit (CCC), Nikel-Krom alaşım (Ni-Cr) gibi birçok farklı malzeme kullanılıp bu direnç elemanları mümkün olan en iyi şekilde vakum odasından izole edilmeye çalışılmış, böylece direnç elemanının ömrü uzatılıp gaz salınımı yapması engellenmesi hedeflenmiştir (Kang et al., 2011).



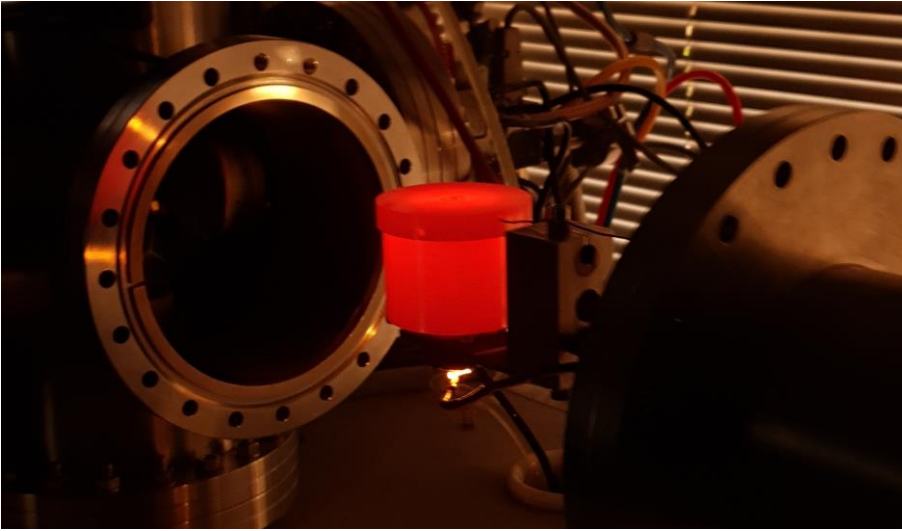
Şekil 3.1 Rezistif Alttaş Isıtıcısı Rezistansları: (a) karbon karbon kompozit; (b) grafit; (c) silisyum karbür; (d) Nikel-Krom (Thermic Edge, 2019)

Tüm bu geliştirmelere rağmen, ultra-yüksek vakum etkilerinden kaynaklı olarak, reaktif gazlar atomik boyutlarda da olsa zamanla direnç elemanının olduğu bölgeye sızarak yüksek sıcaklıklarda bu direnç elemanı üzerinde korozif etkiler oluşturmakta ve hem ısıtıcının ömrünü kısaltmakta hem de vakum odasına çeşitli gaz salınımlarına neden olmaktadır. Ayrıca reaktif gazların etkisi ile aşınan direnç elemanlarının ısıtma performansı zamanla azalıp bir süre sonra işlevlerini tamamen yitirmektedir. Çevreden izole olması amacı ile genellikle bir metal veya seramiğin içine gömülü şekilde üretilen bu alttaş ısıtıcıları, kapalı sistem şeklinde olduklarından dolayı tamirinin mümkün olmamasından dolayı atık malzeme haline gelirler ve yüksek maliyetler ile yenilerinin satın alınması gerekir.

3.2 IŞINIMSAL ALTTAŞ ISITICILARI

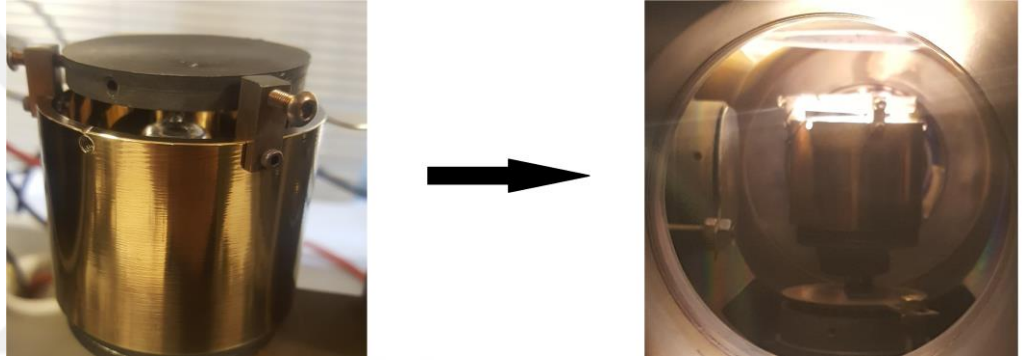
Rezistif alttaş ısıtıcılarında karşılaşılan problemlerin önüne geçebilmek amacıyla, gelişen teknoloji ve malzeme biliminin sunduğu avantajlar sayesinde 2000’li yılların başlarında yeni nesil olarak ifade edebileceğimiz ışınımsal alttaş ısıtıcıları geliştirilmeye başlanmıştır. Işınımsal alttaş ısıtıcılarının çalışma prensibi; bir ışık kaynağından çıkan yüksek enerjili fotonların, bir yüzey tarafından absorbe edilmesi ile bu yüzeye ısı enerjisi kazandırılması temeline dayanmaktadır.

Işınımsal alttaş ısıtıcıları, mekanik tasarımlarına göre ikiye ayrılır. Bunlardan ilki, Şekil 3.2 ile verildiği gibi, kaynaktan çıkan ışığın tüm ısıtıcı bloğu tarafından absorbe edilerek, tüm bloğun ısındığı sistemlerdir. Tüm bloğun ısıtıldığı sistemlerde, ince film büyütülmesi sırasında vakum odasındaki gaz akışının büyük hacimli bloğun sıcaklığı üzerinde bir değişime neden olmaması amaçlanmaktadır. Isınan yüzey ne kadar büyük olursa, ultra-yüksek vakumda ortalama $1-5 \times 10^{-1}$ mbar mertebesindeki gaz akışının bu yüzey üzerinde yapacağı sıcaklık değişimi o kadar az olacak, ve alttaş sıcaklığı o kadar stabil olacaktır. Tamamen kapalı sistem olarak üretime elverişli olmasından dolayı, kullanıcı tarafından modifiye veya tamiri mümkün olmayacak şekilde üretilbildiği için günümüzde üretilen ticari alttaş ısıtıcılarının neredeyse tamamı bu tasarımı temel almaktadır. Bu tasarımın en belirgin dezavantajı, tüm blok ısındığı için ışık kaynağı ve bağlantı ekipmanlarının 800°C ’lere varan sıcaklıklardan kritik ölçüde zarar görmesidir.



Şekil 3.2 Alttaş ısıtıcısının tamamının ısındığı sistem

Diğer sistemde ise, Şekil 3.3 ile verildiği gibi, ışığın uygun bir iç geometriye sahip blok yüzeyinden alttaş tutucuya odaklanmasıyla, yalnızca bu bölgenin ısınması hedeflenir. Bu tasarımda kaynaktan çıkan yüksek enerjili fotonların büyük çoğunluğu alttaş tutucuya odaklandığı için düşük basınçlardaki gaz akışı, alttaş sıcaklığında herhangi bir değişime neden olmaz. Bu yöntemde ise ısıtıcı bloğu her ne kadar kaynaktan gelen ışığın önemli bir kısmını yansıtırsa da, kullanılan malzemenin cinsine ve yüzey pürüzlülüğüne göre ışığın bir kısmını absorbe etmesi kaçınılmazdır. Işığı absorbe eden blok ise, alttaşın bulunduğu kısma göre göreli düşük sıcaklıklara kadar ısınacak olsa da, ultra-yüksek vakumda reaktif gazların etkisiyle korozyona uğrayarak parlaklığını kaybedebilmektedir.



Şekil 3.3 Yansıtıcı yüzey geometrili halojen alttaş ısıtıcısı

Her iki tip ışımamsal alttaş ısıtıcısı tasarımı da kendilerine özgü bir takım avantaj ve dezavantajları vardır. Sonuç olarak her iki tasarımın da tam verimlilikle çalışabilmesi için gerek bağlantı elemanları, gerekse blok etrafında bir soğutma ihtiyacı vardır ve bu durum, vakum odacığına ekstra ekipman girmesinin yanında yüksek maliyetli dış soğutma ünitesi ihtiyacını da beraberinde getirmektedir.

4. HALOJEN ALTTAŞ ISITICISI GELİŞTİRİLMESİ

Oksit kristal ince filmlerin üretim süreçlerindeki sistemsel zorlukların başında alttaş ısıtıcıları problemleri gelmektedir. Literatürde bu konudaki akademik çalışma sayısının azlığı, bu alanın sektöründe öncü şirketlerin inisiyatifine bırakıldığına bir işarettir. Bu durumda bu şirketler, bilimsel kaygıların ötesinde, ticari kaygılar ile stratejilerini belirleyip sistemleri ticari kaygılar ile geliştirdiklerinden ötürü karşılaşılan bir takım sorunların giderilmemesi de kaçınılmaz olmaktadır. Bu sorunlardan başlıcaları; yüksek maliyet, kullanım süresi ile orantılı şekilde azalan ısıtma performansı ve buna bağlı olarak kısa ömürlülük, vakum odası içerisinde ve dışarısında ekstra ekipman kullanımı gereksinimi ve ticari kâr amacı güdülerek kapalı sistem olarak üretilen ışınımsal ısıtıcıların araştırmacılar tarafından tamirinin mümkün olmamasıdır. Bu tez çalışmasında hem bu dezavantajların giderilmesi, hem de çalışmalarında böyle bir sistem kullanımı gereksinimi duyan araştırmacılar için bir alternatif sunmak amaçlanmıştır.

İnce filmler bazında geniş bir üretime elverişlilik yelpazesi amaçlanan bu tez çalışmasında, gerektirdiği agresif üretim koşullarından dolayı, bilinen en zorlu vakum oksit ince film büyütülmesi süreçlerinden olan YBCO ince film büyütülmesi, geliştirilen alttaş ısıtıcısının test süreci olarak belirlenmiştir. Bu süreçte kullanılan ticari alttaş ısıtıcılarında karşılaşılan başlıca problemler;

- Yüksek Maliyet
- Zamanla düşen ısıtma performansı
- Kısa ömürlülük
- Geri dönüşümsüzlük / Tamir edilememe
- Vakum odasına parçacık salınımı
- Vakum odasına soğutma ekipmanı eklemek ve bunların dış ünitelerini temin etmek

Olarak belirlenmiştir.

Tüm bu dezavantajların giderilmesi için tasarlanan halojen alttaş ısıtıcısında, düşük maliyeti, kızılötesi bölgedeki yüksek ışıma miktarı ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılığı avantajlarından dolayı, DC 36V, 400W halojen

kuvars tip ampul (Osram HLX 64663), ışık kaynağı olarak seçilmiştir. Bu ampulün gerekli tüm özellikleri Çizelge 4.1 ile detaylı şekilde verilmiştir.

Çizelge 4.1 Osram HLX 64663 Halojen Kuvars Tip Ampulün Başlıca Özellikleri

| Osram HLX 64663 | |
|--------------------------------|-------------|
| Ampul Tipi | T6 |
| Maksimum Güç | 400 Watt DC |
| Malsimum Voltaj | 36 V DC |
| Lüminesans | 16,200 lm |
| Renk Sıcaklığı | 3250K |
| Ortalama Ömür | 50 Saat |
| Maksimum Yükseklik | 60 mm |
| Işık Merkezi Yüksekliği | 36mm |
| Maksimum Çap | 16mm |

Bu alttaş ısıtıcısının tasarımında, vakum odasında ve dışarıda soğutma ekipmanları kullanılmasına ihtiyaç duyulmaması ve dolayısıyla maliyetleri düşürmek için kaynaktan çıkan ışığın yalnızca alttaşın bulunduğu alana yansıtıldığı bir geometri planlanmıştır. Daha önce bahsedildiği üzere her ne kadar kaynaktan çıkan ışığın büyük bir kısmı hedeflenen yüzeye yansıtılsa da, ışığın bir kısmı yansıtıcı yüzey tarafından absorbe edilip ısınmakta ve bu yüzey sıcaklık, yüksek vakum ve reaktif gazların etkisiyle korozyona uğrayabilmektedir. Bu problemin önüne geçilebilmesi için, üretilen alttaş ısıtıcısının tüm aksamalarının, gerekli özellikleri Çizelge 4.2 verilen yüksek sıcaklıkta oksijene son derece dayanıklı AISI 310 kalite paslanmaz çelikten imal edilmesi uygun görülmüştür.

Çizelge 4.2 AISI 310 paslanmaz çelik özellikleri (AISI, 2019)

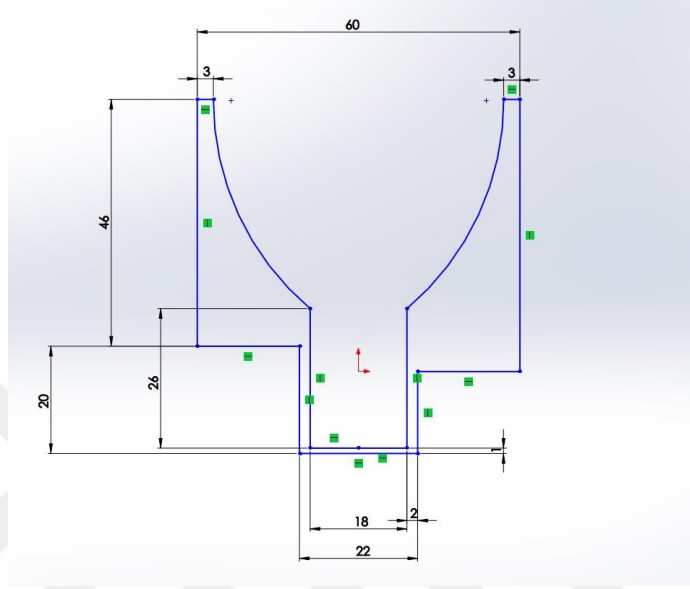
| AISI 310 Paslanmaz Çelik | | |
|---------------------------------|-----------|---------------------------------------|
| Yoğunluk | | 7,9x10 ³ kg/m ³ |
| Termal İletkenlik | 100°C | 14,2 W/m.K |
| | 500°C | 18,5 W/m.K |
| | 1000°C | 23,6 W/m.K |
| Termal Genişleme | 0-100 °C | 15,9 µm/m.K |
| | 0-315 °C | 16,2 µm/m.K |
| | 0-540 °C | 17,0 µm/m.K |
| | 0-700 °C | 17,8 µm/m.K |
| | 0-1000 °C | 18,9 µm/m.K |
| Erime Sıcaklığı Aralığı | | 1400-1450 °C |
| Gerilim Mukavemeti | 500 °C | 480 MPa |
| | 600 °C | 425 MPa |
| | 700 °C | 315 MPa |
| | 800 °C | 205 MPa |
| | 925 °C | 117 MPa |
| | 1040 °C | 76 MPa |
| %2 Ezilme Mukavemeti | 500 °C | 180 MPa |
| | 600 °C | 156 MPa |
| | 700 °C | 130 MPa |
| | 800 °C | 105 MPa |
| Oksitlenme Sıcaklığı | | ~1250 °C |

Belirlenen tüm problemlere çözüm olarak sunulan fikirlerin tasarım aşamasında öncelikli olarak düşük enerji tüketimlerinde yüksek performans, vakum odasına parçacık salınımı olmaması ve uzun ömürlülük, sonrasında da üretim kolaylığı, düşük maliyet ve kullanıcı tarafından kolay bakım ve tamir öncelikli hedefler olarak belirlenmiş ve alttaş ısıtıcısı bu çerçevede tasarlanmıştır.

4.1 Ana Blok

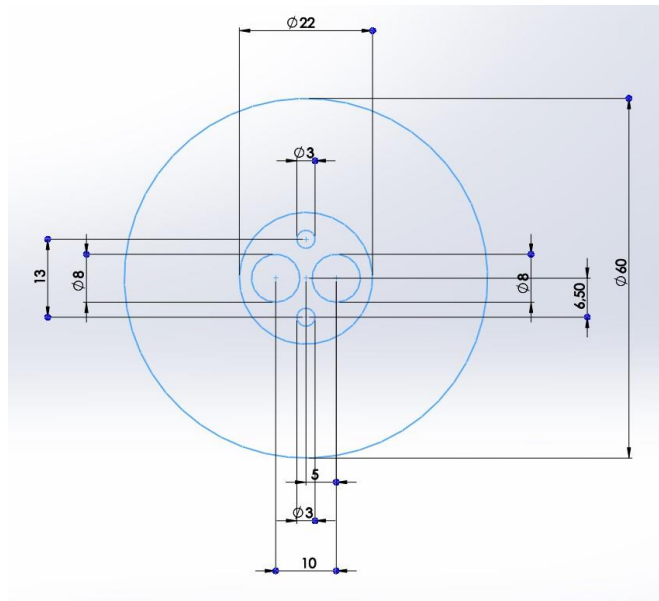
AISI 310 kalite paslanmaz çelikten üretilen bu blok, ışık kaynağından çıkan yüksek enerjili fotonların alttaş tutucuya odaklanması, ampulün ve duyun sabitlenebilmesi ve geliştirilen bu alttaş ısıtıcısının kullanılacağı sisteme montaja uygun olması için özel olarak tasarlanmıştır. Bloğun iç geometrisi, kaynaktan

çıkan ışığın, alttaş tutucusunun altında ~12mm çaplı bir daire şeklinde odaklanmasını sağlayacak şekilde özel olarak seçilmiştir. Ayrıca bloğun alt kısmının dış tarafına vida dişleri açılmış ve blok, kullanılacağı sisteme montaja uygun hale getirilmiştir. Yapılan tasarımın iki boyutta ölçeklendirilmiş çizimi, Şekil 4.1 ile verilmiştir.



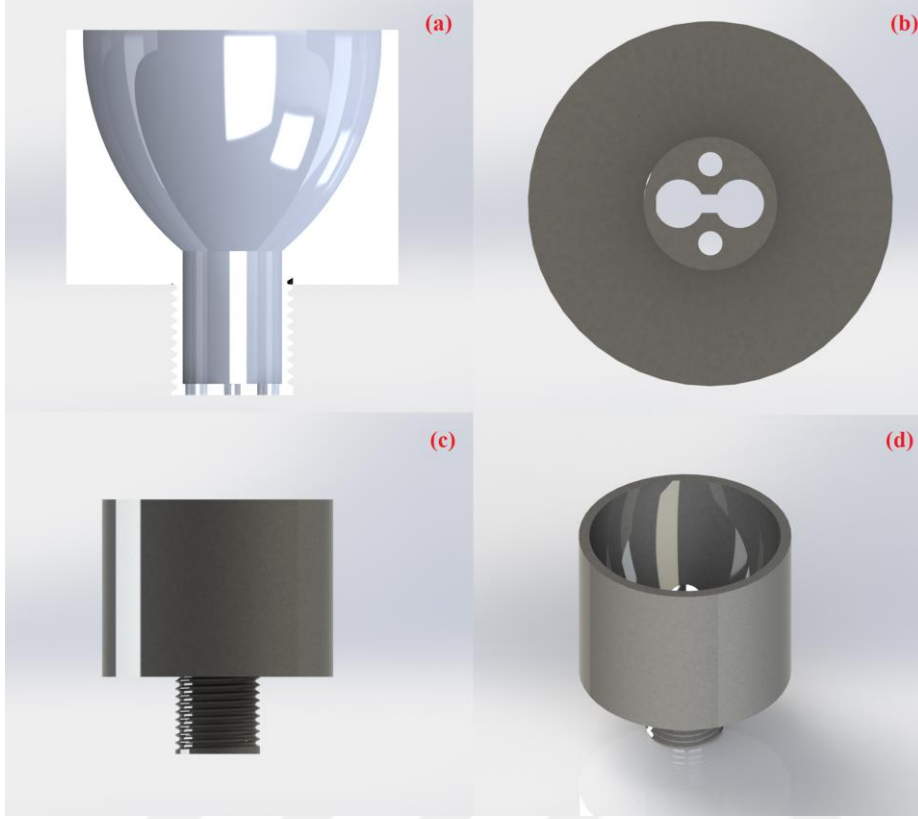
Şekil 4.1 Ana blok; x ekseninden iki boyutlu ölçekli çizimi

Bloğun alt kısmında ampulün takılacağı duyun bağlantı yerleri ve ampulün güç bağlantıları için çıkış yerleri bulunmaktadır. Bunun için yapılan tasarımın iki boyutlu ölçeklendirilmiş çizimi, Şekil 4.2 ile verilmiştir.



Şekil 4.2 Ana blok; -z ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş çizimi.

Isıtıcı ana bloğu tasarımı, 3 boyutlu olarak Şekil 4.3 ile verildiği gibi tamamlanmıştır.



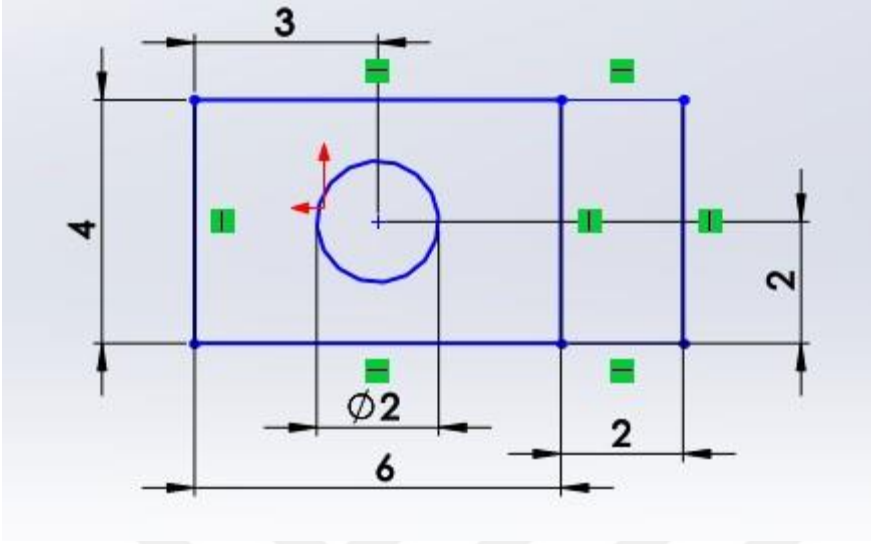
Şekil 4.3 Ana blok: (a) x ekseninden 3 boyutlu kesit görsel; (b) z ekseninden 3 boyutlu görsel; (c) x ekseninden 3 boyutlu görsel (d) 3 boyutlu tam görsel

Tasarlanan blok CNC torna ve freze kullanılarak üretilmiştir. Daha sonra iç kısmının maksimum yansıtma performansı sunması için yansıtıcı yüzey, Şekil 4.4'de görüldüğü gibi, ayna parlaklığına ulaşınca kadar polisaj yapılmıştır.



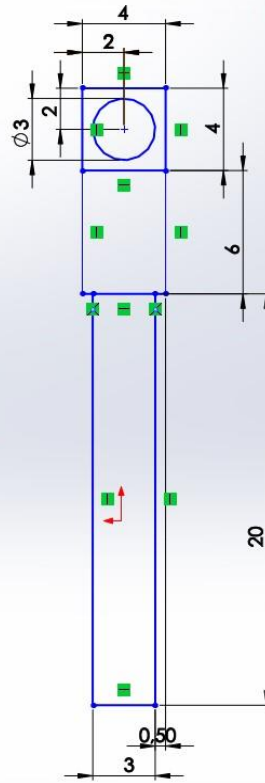
Şekil 4.4 Üretilen ana bloğun iç yüzey fotoğrafı.

Yapılan tasarımda ampul bacaklarının gireceği ve buralarda sabitleneceği yuva yerleri, Şekil 4.6 ile verilen, z ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş çizim ile belirtildiği şekilde tasarlanmıştır.



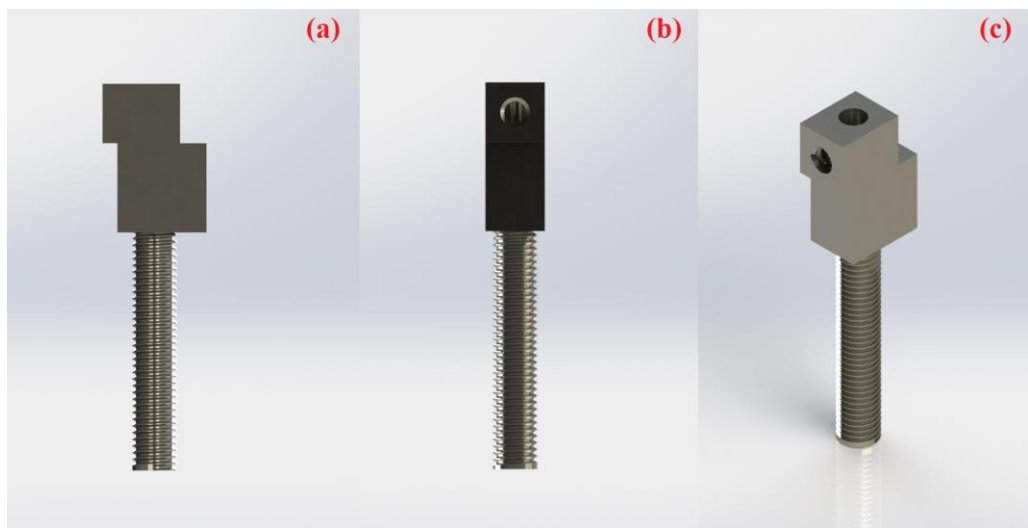
Şekil 4.6 Ampul bağlantı elemanı; z ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş çizim.

Yapılan tasarım, sistemde her bir parçanın birbirine sağlam ve güvenilir bir şekilde monte edilebilmesi için düşünülmüş, bundan dolayı ampul bacaklarının bu bağlantı elemanlarına vidalanarak sabitlenmesi uygun görülmüştür. Bunun için, Şekil 4.7 ile verilen, y ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş çizim ile gösterildiği kısmın delinip, içlerinin vida adımı olarak işlenmesi tasarlanmıştır. Böylece ampul bacakları, tasarlanan yuvaya yerleştirildiğinde bu bacaklar çelik vidalar ile sıkılarak yuvaya sabitlenecek; hem montaj hem de elektriksel bağlantılar yönünden güvenli bir kullanım sağlanacaktır.



Şekil 4.7 Ampul bağlantı elemanı, y ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş çizim.

Tasarlanan ampul bağlantı elemanları, iki adet olmak üzere Torna ve tel erezyon ile tasarıma uygun şekilde üretilmiştir. Yapılan tasarım, 3 boyutlu çizimleri ile birlikte Şekil 4.8 ile verilmiştir.



Şekil 4.8 Ampul Bağlantı Elemanı 3 boyutlu Çizimi: (a) x eksen; (b) y eksen; (c) x-y-z köşe noktası.

4.3 Alttaş Tutucu

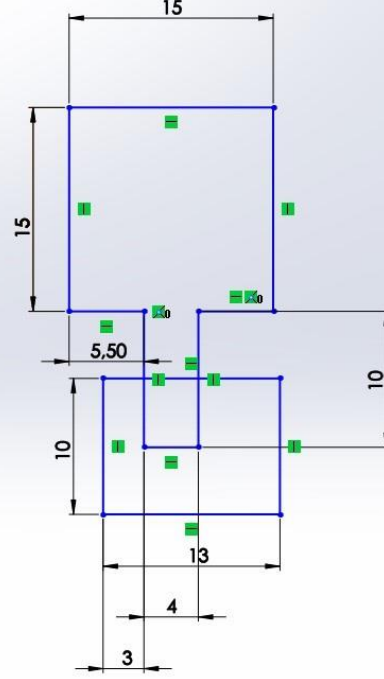
Geliştirilen bu alttaş ısıtıcısı, ticari ışımsal alttaş ısıtıcılarının aksine, kullanıcıya yıllar boyu hizmet etmesi amaçlanan, kullanımı, tamir ve bakımı kolay bir sistem olması hedefi ile tasarlandığından dolayı olabildiğince kompakt, montajı kolay ve açık bir sistem olarak düşünölmüştür. Bundan dolayı alttaş tutucu, alttaş ısıtıcısının tamamını kapatmak yerine kristal ince film aygıt teknolojilerinde sıklıkla kullanılan 10x10 mm² yüzey alanlı alttaşlar için özel olarak tasarlanmıştır. Yansıtıcı yüzey, kaynaktan çıkan yüksek enerjili fotonların neredeyse tamamını bu alana odaklayacak olduğu için, alttaş tutucunun yüzey alanının küçüklüğü, aynı zamanda gerektiğinde hızlı ısınma ve soğuma avantajlarını da beraberinde getirmektedir. Yüksek sıcaklıklarda mekanik şekilsel bozulma miktarının neredeyse olmaması, vakum odasına herhangi bir parçacık salınımı yapmaması ve inconel'in aksine üzerine alttaşın gümüş pasta ile güvenle tutturulabilmesi avantajlarından dolayı AISI 310 kalite paslanmaz çelikten üretilen bu alttaş tutucu, üzerine yerleştirilecek alttaşın tam ortasına denk gelecek derinlikte bir thermocouple yuvasını da bünyesinde barındırmaktadır. Ayrıca bu parça, ısı kaybını önleyerek daha düşük elektriksel güç kullanımı ile daha yüksek sıcaklık performansı almak ve yüksek sıcaklıklarda istikrarlı bir şekilde çalışabilmek için, termal özellikleri Çizelge 4.3 ile verilen, Alümina (Al₂O₃) bir ara parça ile montajı yapılacak şekilde düşünölmüş, tasarlanmış ve CNC torna ve freze kullanılarak üretilmiştir.

Çizelge 4.3 Al₂O₃ termal özellikleri.

| Al₂O₃ (Alümina) | |
|--|----------|
| Erime Noktası | 2072°C |
| Termal İletkenlik | 30 W/m.K |

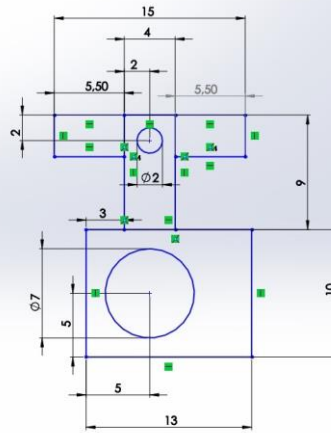
Ana bloğun iç yüzeyinden odaklanan ışığın tamamının maksimum verimlilikle kullanımı için tasarlanan bu alttaş tutucu, Şekil 4.9 ile verilen z ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmüş çizimde göröldüğü gibi, sıcaklığı alttaş üzerine homojen dağıtacak bir geometride tasarlanmıştır. Böylece hem alttaşın sabitleneceğı yüzeyde merkezden uzaklaştıkça bir sıcaklık farkı olmayacak, hem de kaynaktan çıkan fotonlar maksimum verimlilik ile kullanılacaktır. Burada

alttaşın sabitleneceği alanın bağlantı noktası, ısının bu alandan dışarıya gitmesini mümkün olduğunca azaltmak amacıyla olabildiğince ince tasarlanmıştır.



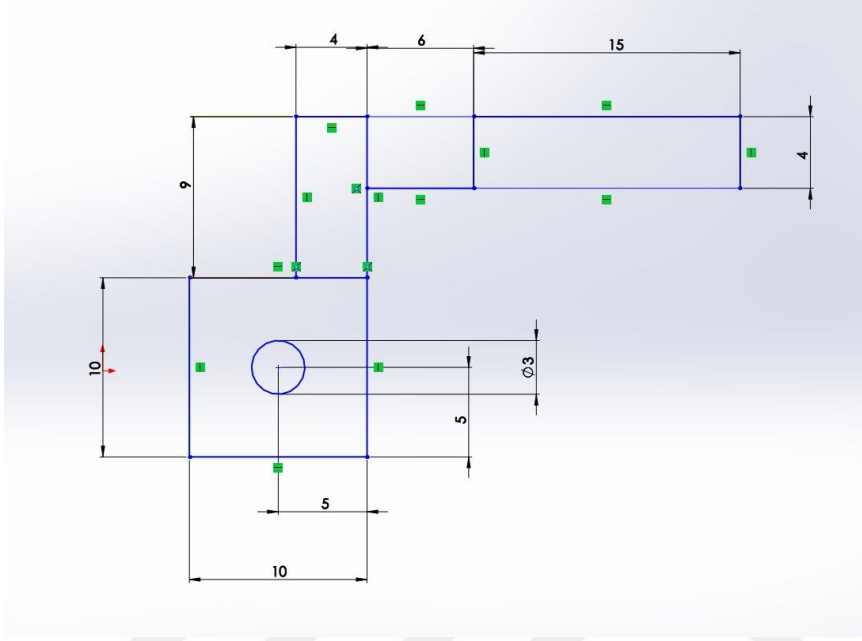
Şekil 4.9 Alttaş tutucu; z ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş çizim.

Bu alttaş tutucuda, Şekil 4.10'de verilen y ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş çizimde görüldüğü gibi, tutucunun Alümina bağlantı çubuğunun geçirilip sabitleneceği bir yuva ve derinliği alttaşın tam merkezine denk gelecek şekilde ölçeklendirilmiş bir thermocouple yuvası tasarlanmıştır.



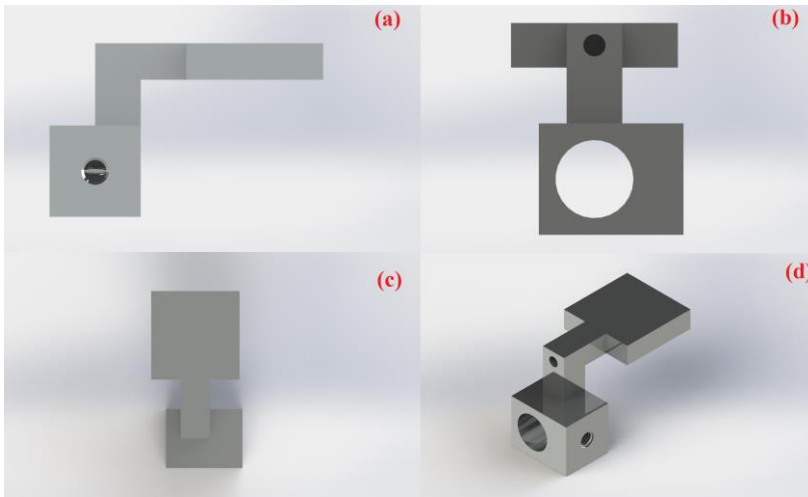
Şekil 4.10 Alttaş Tutucu; y ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş resim.

Alttaş tutucunun alümina çubuğa mekanik olarak sabitlenebilmesi için, Şekil 4.11 ile verilen x ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş resimde verildiği şekilde, alttaş tutucu ile alümina çubuğun bağlandığı noktaya bir vida deliği açılmış ve alttaş tutucunun alüminaya sabitlenmesinin bu vida yardımıyla sıkıştırılarak yapılması planlanmıştır.



Şekil 4.11 Alttaş tutucu; x ekseninden iki boyutlu ölçeklendirilmiş resim.

Bu şekilde tasarımı tamamlanan alttaş tutucunun üç boyutlu resimleri, Şekil 4.12 ile verildiği şekilde tamamlanmıştır.

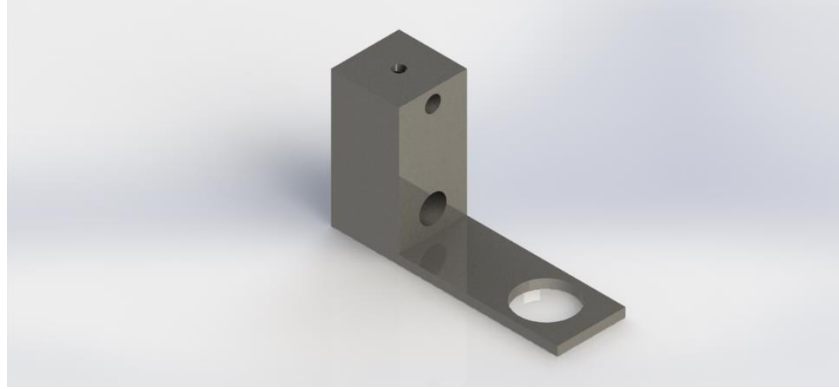


Şekil 4.12 Alttaş tutucu: (a); x ekseninden üç boyutlu çizim; (b) y ekseninden üç boyutlu çizim; (c) z ekseninden üç boyutlu çizim; (d) x-y-z köşe noktasından üç boyutlu çizim.

Ana bloğun iç yüzeyinden yansıtılan ışığı absorbe ederek ısınması için tasarlanan bu alttaş tutucu, üretimden parlak bir şekilde çıkmaktadır ve bu durum üzerine gelen ışığın büyük bir bölümünü yansıtacağı anlamına gelmektedir. Bundan dolayı bu parça, laboratuvar altyapımızda bulunan kübik fırın kullanılarak hava atmosferinde 1300°C’de 8 saat süren bir ısıl işleme tabi tutulmuş ve bu işlem sonucunda yüzeyinin oksitlenmesi ile koyu, mat siyah bir renk elde edilmiştir.

4.4 Alttaş Isıtıcısı – Sistem Ara Bağlantı Elemanı

Geliştirilen bu alttaş ısıtıcısı, ticari alttaş ısıtıcılarının aksine bir başlık şeklinde değil, herhangi bir in-situ ince film üretim sisteminde tak-kullan şeklinde çalışabilecek şekilde geliştirilmiştir. Bundan dolayı, kullanılacağı sisteme özel bir ara bağlantı elemanına ihtiyaç duymaktadır. Bu şekilde hem multi-target sistemlerde fazladan bir başlık kullanımına izin vermekte, hem de sistemlerin flanş tiplerinden bağımsız olarak tüm sistemlerde kullanıma elverişli hale getirilmiştir. Laboratuvar altyapımızda mevcut UHV Multi-Target RF/DC Magnetron Sputter sistemi için özel olarak geliştirilen, oldukça basit bir tasarıma sahip bu ara bağlantı elemanı, gerektiğinde diğer tüm sistemler özelinde ufak değişiklikler ile istenilen şekilde basitçe yeniden düzenlenip çok düşük maliyetler ile üretime elverişlidir. Bu ara bağlantı elemanının sıcaklığı $\sim 100^{\circ}\text{C}$ ’yi geçmeyecek olmasına rağmen, hem sağlamlık hem de bir güvenlik önlemi olarak AISI 310 kalite paslanmaz çelikten üretilmiştir. Bu bağlantı elemanının tasarımı, her sisteme özel düzenlenmesi gerektiğinden dolayı yalnızca 3 boyutlu görseli şeklinde Şekil 4.13 ile verilmiştir.



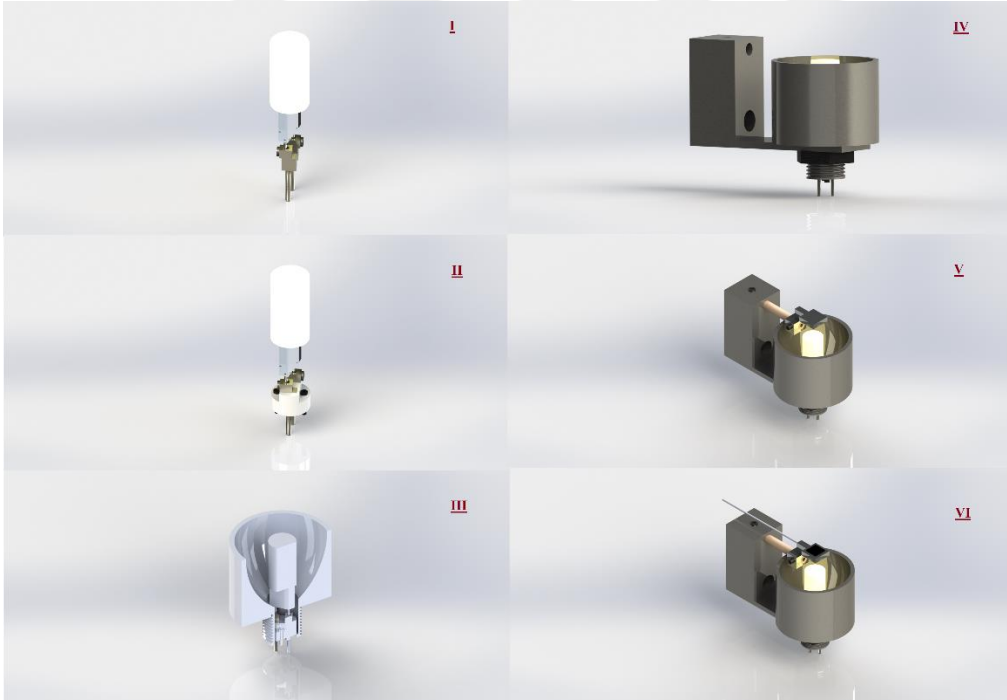
Şekil 4.13 Halojen Alttaş Isıtıcısı – Sistem Ara Bağlantı Elemanı 3 Boyutlu Görseli

4.5 Halojen Alttaş Isıtıcısı

Tüm elemanları tasarıma uygun şekilde üretilen bu alttaş ısıtıcısı, üretimden ortaya çıkan yağ, çapak gibi kirlerden arındırılarak montaja hazır hale getirilmiştir. Montaj işlemi sırasıyla;

- 1) Ampul => Ampul Bağlantı Elemanları
- 2) Ampul Bağlantı Elemanları => Duy
- 3) Duy => Ana Blok
- 4) Ana Blok & Alttaş Tutucu => Sistem Ara Bağlantı Elemanı
- 5) Thermocouple & Güç Kabloları => Halojen Alttaş Isıtıcısı

şeklinde yapılmış ve montaj şeması 3 boyutlu görsel olarak Şekil 4.14 ile verilmiştir.

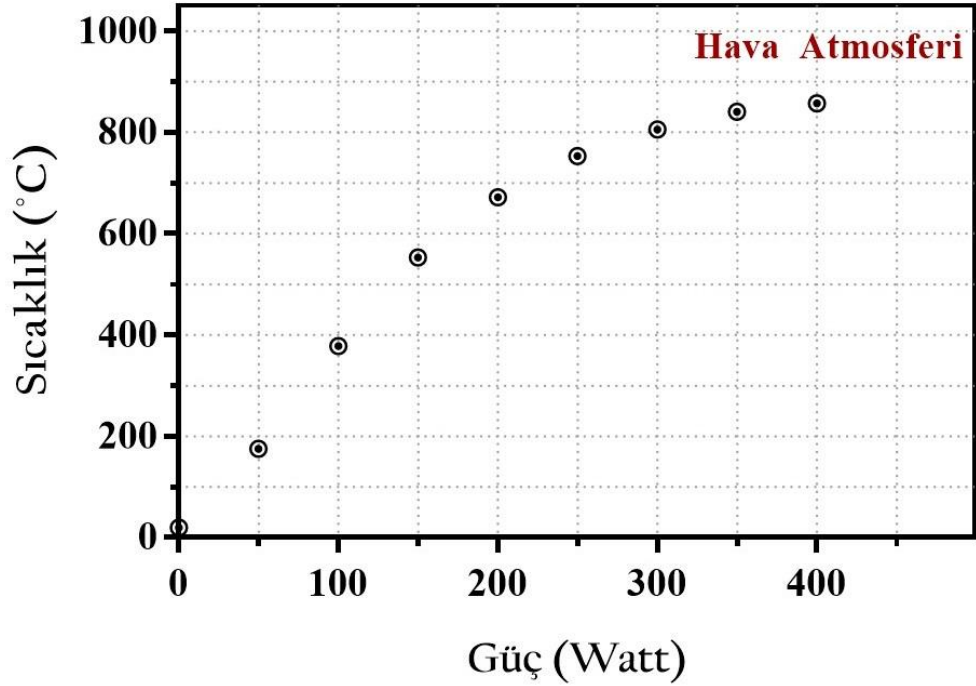


Şekil 4.14 Halojen alttaş ısıtıcısı montaj şeması.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

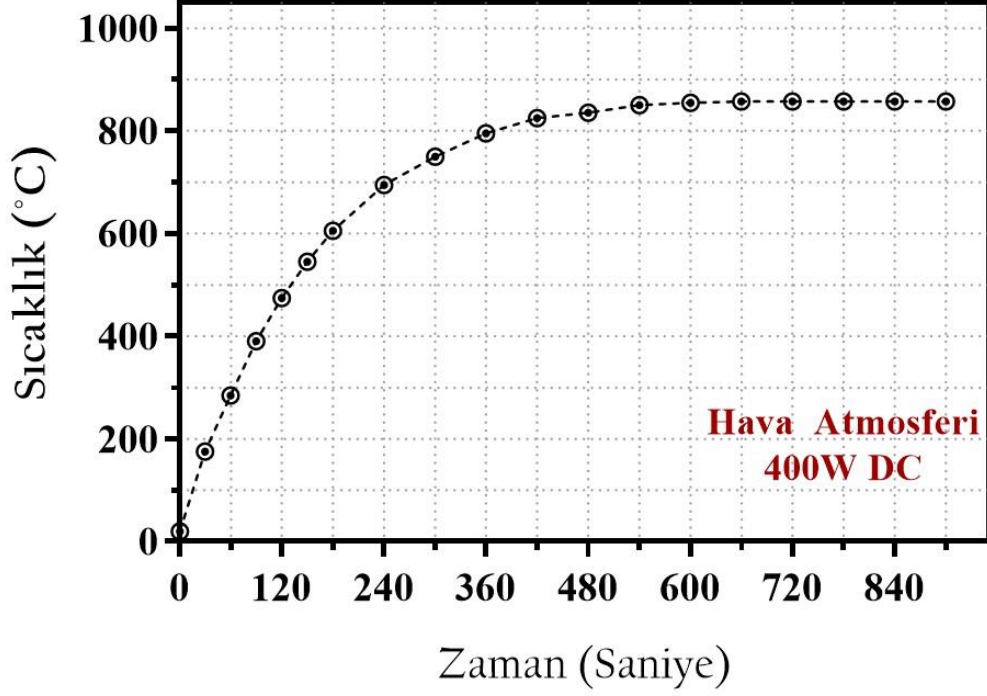
5.1 Hava Ortamında Sıcaklık ve Performans Testi

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen halojen alttaşı ısıtıcısı, her ne kadar in-situ vakum büyütme sistemleri özelinde çalışılabilirlik için tasarlanmış olsa da, aynı zamanda ex-situ ince film ısıtıcı uygulamalarına da elverişli bir geometriye sahiptir. Bundan dolayı hava ortamında yapılması amaçlanabilecek olan ısıtıcı işlemlere uygunluğu bu aşamadaki performans testleri sonuçları ile belirlenecektir. Hava ortamında yapılan Sıcaklık – DC Güç ve Sıcaklık – Zaman testlerinin tamamında k-tip inconel kılıflı thermocouple ve 40V, 40A max DC güç kaynağı kullanılmıştır. Sıcaklık – Güç testi, halojen ışık kaynağına uygulanan güç 400W'a kadar 50 ve katları şeklinde arttırılarak ve sıcaklık stabil olana kadar beklenilerek yapılmış ve elde edilen veriler Şekil 5.1 ile verilmiştir.



Şekil 5.1 Hava atmosferinde Sıcaklık-Güç grafiği

Sıcaklık – Güç testi tamamlanıp sistem oda sıcaklığına kadar soğuduktan sonra, Sıcaklık – Zaman testi için alttaşı ısıtıcısı maksimum güç değeri olan 400W'ta çalıştırılmış ve kronometre ile geçen zaman takip edilmiştir. Bu test sonuçlarından elde edilen veriler, Şekil 5.2 ile verilmiştir.



Şekil 5.2 Hava atmosferinde Sıcaklık-Zaman grafiği

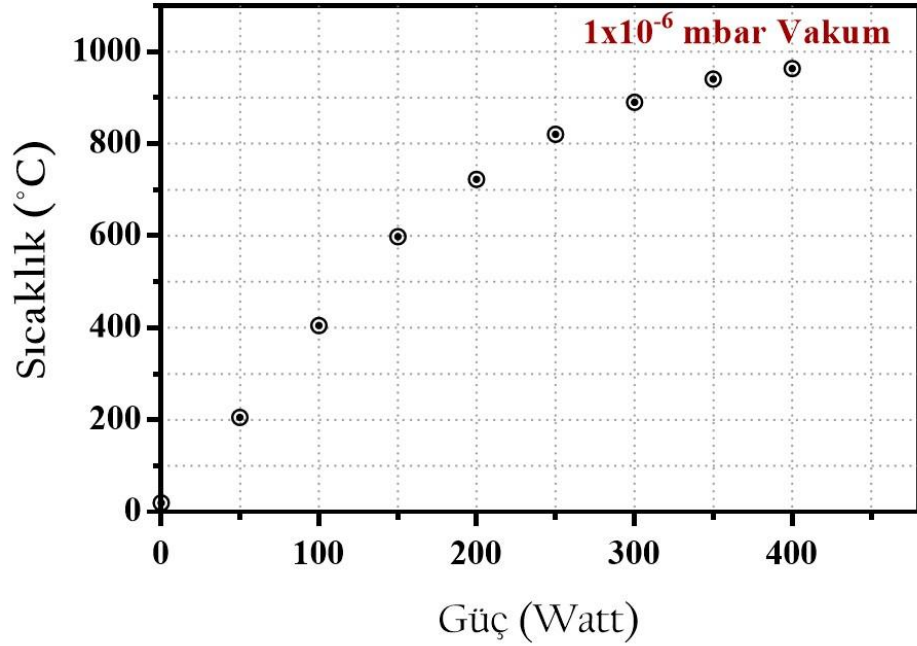
Her iki test sonucundan da görüldüğü üzere, üretilen halojen alttaş ısıtıcısı, hava ortamında maksimum 857°C sıcaklığa ulaşmış ve bu sıcaklıkta ± 1 °C salınım ile istikrarlı olarak çalışmıştır. Bu veriler ile, geliştirilen bu alttaş ısıtıcısının 800°C üzeri sürekli sıcaklıklarda dahi ex-sitü ısıtma işlemlerinin uygulanabilmesine elverişli olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, alttaş tutucunun tasarım sürecinde açıklanan, ısıyı alttaş tutucuda, alttaşın sabitleneceği yüzeyde hapsedme amacına ulaşıldığı, Şekil 5.3 ile verilen, Sıcaklık – Zaman testi tamamlandığında ışık kaynağının kapatıldığı anda alttaş tutucu kısmının fotoğrafı ile gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Alttaş Tutucunun 857°C'de Işık Kaynağı Kapatıldığı Anda Fotoğrafı

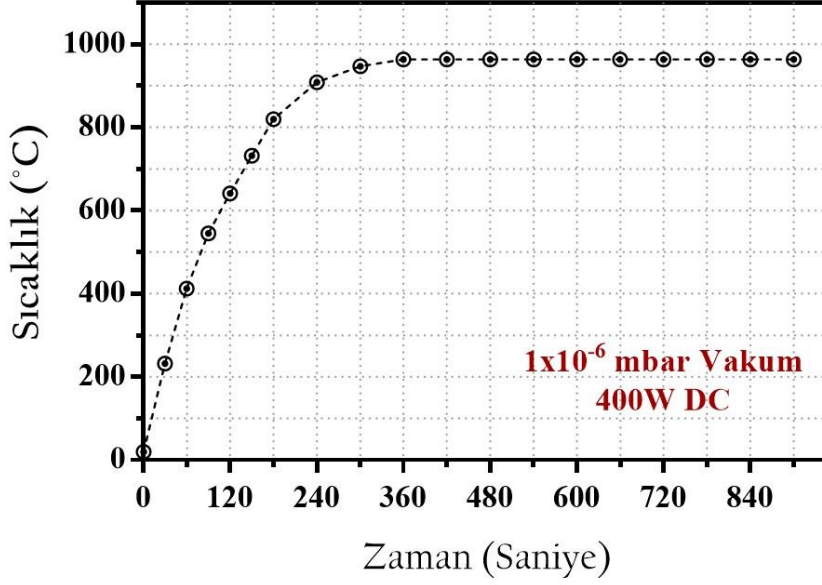
5.2 Ultra-Yüksek Vakumda Sıcaklık ve Performans Testleri

Geliştirilen alttaş ısıtıcısının sıcaklık performansının in-situ ince film üretimine elverişliliği ve maksimum performans testlerinin ilk aşamasının gerçekleştirildiği bu aşamada, geliştirilen alttaş ısıtıcısı, UHV RF/DC Magnetron Sputter sistemine monte edildikten sonra sistem turbomoleküler vakum pompası ile 1×10^{-6} mbar seviyesine kadar vakumlanmıştır. Sistem iç basıncı stabil duruma geldiğinde Sıcaklık – Güç testi yapılmıştır ve elde edilen veriler Şekil 5.4 ile verilmiştir.



Şekil 5.4 UHV Seviyesinde Sıcaklık-Güç grafiği

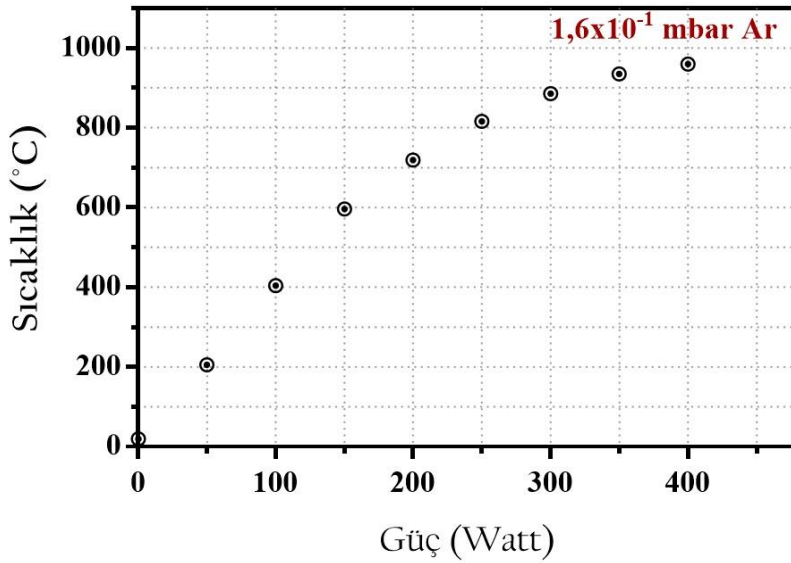
Sıcaklık – Güç testi tamamlandığında, sistemin oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiş ve ardından 400W güç ile Sıcaklık – Zaman testi uygulanmıştır. Bu testten elde edilen veriler Şekil 5.5 ile verilmiştir.



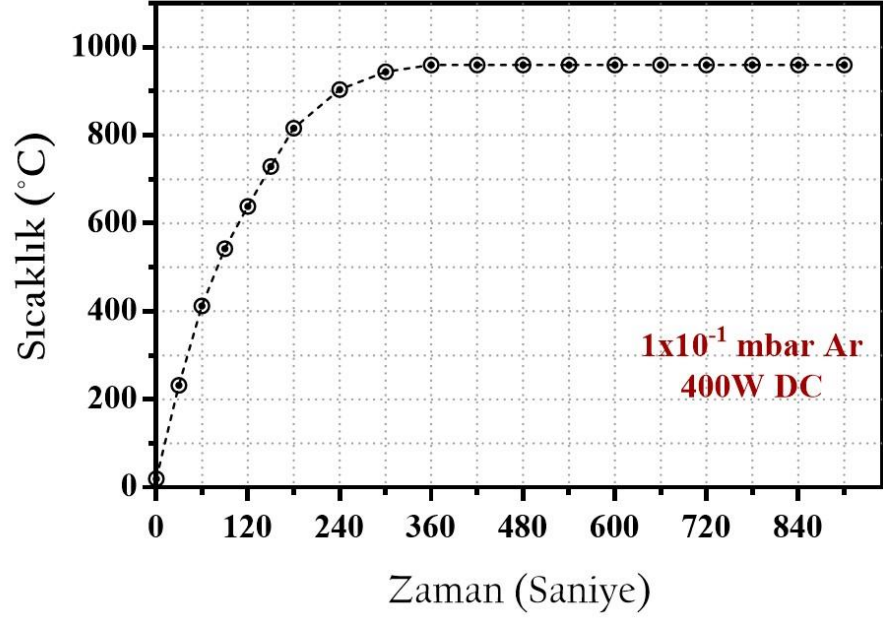
Şekil 5.5 UHV seviyesinde Sıcaklık-Zaman grafiği

1×10^{-6} mbar vakumda uygulanan Sıcaklık – Güç ve Sıcaklık – Zaman test sonuçlarından da görüldüğü üzere geliştirilen alttaş ısıtıcısı, ultra-yüksek vakumda 963°C maksimum sıcaklığa ulaşmış ve bu sıcaklıkta $\pm 1^\circ\text{C}$ salım ile stabil olarak çalışmıştır.

Daha sonra aynı testler, 1×10^{-6} mbar baz vakumda, $1,6 \times 10^{-1}$ mbar basınçlı Argon gazı akışında tekrarlanarak gaz akışı altında ısıtıcı performansında bir değişiklik olup olmadığı incelenmiş ve bu test sonucunda elde edilen veriler Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 grafikleri ile verilmiştir.



Şekil 5.6 $1,6 \times 10^{-1}$ mbar Argon akışında Sıcaklık-Güç grafiği.

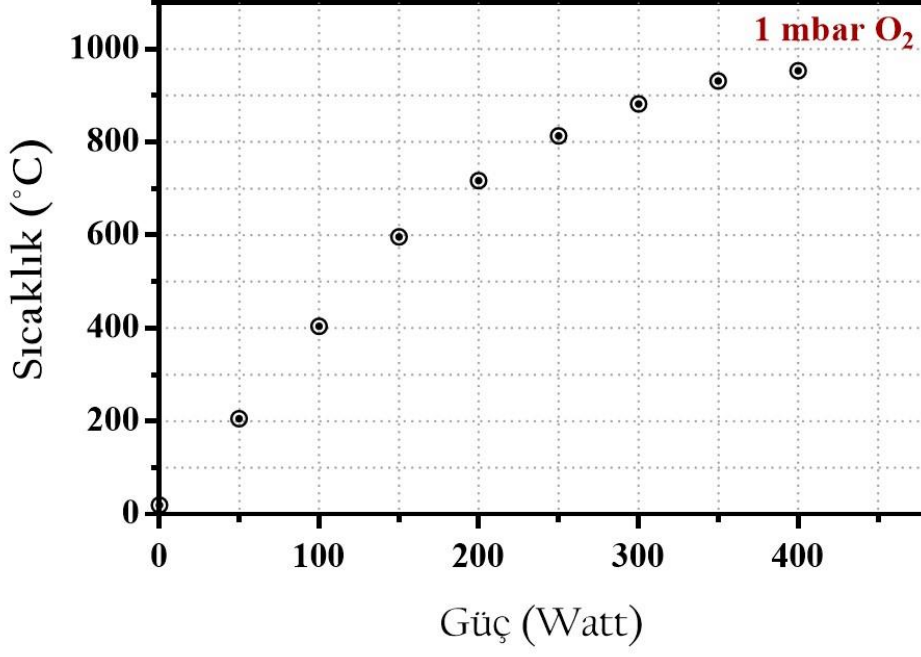


Şekil 5.7 $1,6 \times 10^{-1}$ mbar Argon akışında Sıcaklık-Zaman grafiği.

Taban vakum durumunda maksimum 963°C maksimum sıcaklığa ulaşan alttaş tutucusu, $1,6 \times 10^{-1}$ mbar basınçlı Ar gazı akışı altında maksimum 959°C sıcaklığa ulaşmıştır ve her iki koşulda da bu maksimum sıcaklıklarda $\pm 1^{\circ}\text{C}$ salınım ile istikrarlı bir şekilde çalışmaya devam etmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, geliştirilen halojen alttaş ısıtıcısı yüksek sıcaklıklarda, ultra-yüksek vakum uyumlu çalışabilmekte ve ısıtma performansı vakum odasındaki soygaz akışlarından neredeyse etkilenmemektedir.

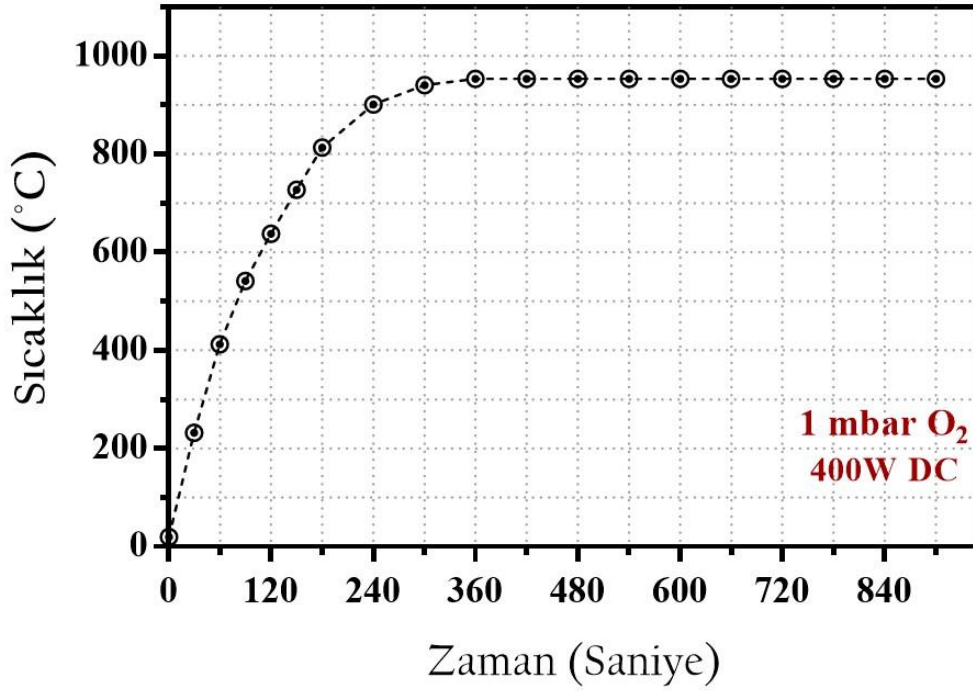
5.3 Korozyon Testi

Bu alttaş ısıtıcısının geliştirilmesindeki birincil nedenlerden bir tanesi, ticari alttaş ısıtıcılarının ultra-yüksek vakum ve yüksek sıcaklıklarda, Oksijen gazının yarattığı korozyon etkilerden kaynaklanan problemlerine çözüm getirilmesidir. Bundan dolayı, üretilecek alttaş ısıtıcısının ana hedeflerinden bir tanesi olarak; yüksek sıcaklıkta ve ultra-yüksek vakumda oksijene dayanıklılık olarak belirlenmiştir. Bu hedefin gerçekleştirilebildiğinin test edileceği bu aşamada, geliştirilen halojen alttaş ısıtıcısı, 1.10^{-6} mbar taban vakumda, 1mbar Oksijen akışında, elde edilen verilerin Şekil 5.8 ile verildiği, Sıcaklık-Güç testine tabi tutulmuştur.



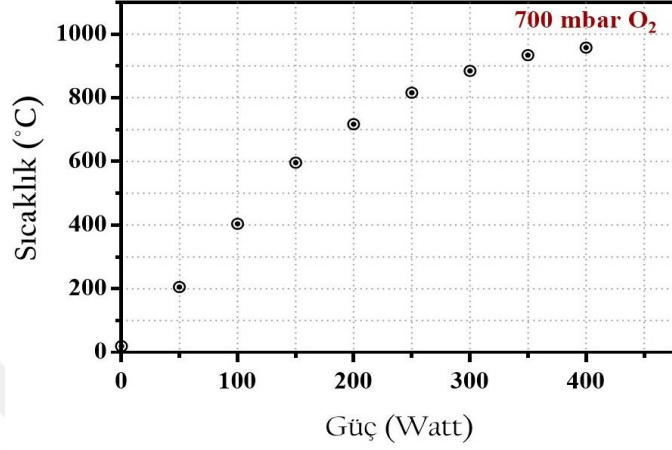
Şekil 5.8 1 mbar Oksijen akışında Sıcaklık-Güç Grafiği

Sıcaklık – Güç testinden sonra sistemin oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiş ve devamında, elde edilen verilerin Şekil 5.9 ile verildiği, Sıcaklık-Zaman testine başlanmıştır.



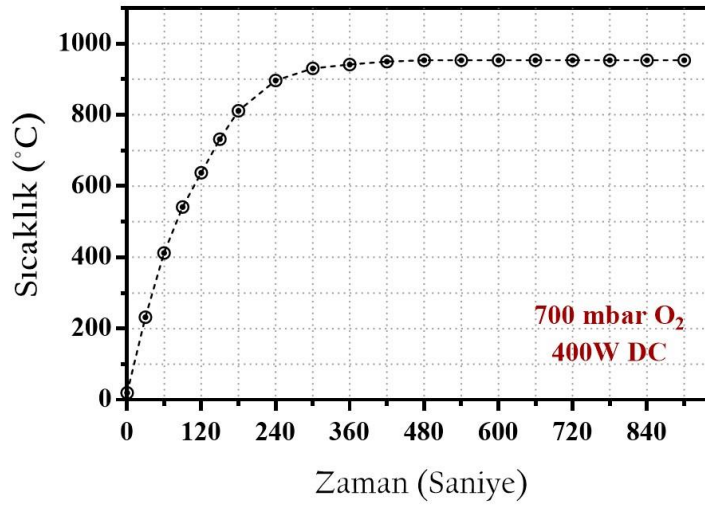
Şekil 5.9 1 mbar Oksijen akışında Sıcaklık-Zaman grafiği

Yüksek sıcaklıklarda oksijen atmosferindeki korozyon testleri ve sıcaklık performansı üzerindeki olası etkilerin incelenmesi için ilk aşamada, elde edilen verilerin Şekil 5.10 ile verildiği, 700mbar Oksijen atmosferindeki Sıcaklık-Güç testi yapılmıştır.



Şekil 5.10 700 mbar Oksijen atmosferinde Sıcaklık-Güç Grafiği

Ölçülen sıcaklık değerlerinde, Argon ve Oksijen akışında yapılan performans testlerinden elde edilen değerlere benzer sonuçlar görülmüştür. Bu durumda Oksijen atmosferinde performans kaybına neden olacak herhangi bir bozulma olmadığı anlaşılmıştır. Alttaş ısıtıcısı, oda sıcaklığına kadar soğuduktan sonra, elde edilen verilerin Şekil 5.11 ile verildiği, 700 mbar Oksijen atmosferinde Sıcaklık-Zaman testi uygulanmıştır.



Şekil 5.11 700 mbar Oksijen atmosferinde Sıcaklık-Zaman grafiği.

Tüm korozyon testi süreçlerinde, ısıtıcıdan vakum odasına herhangi bir parçacık salınımı olup olmadığına bakılmak üzere sistemin iç basıncı takip edilmiştir ve sistem iç basıncında parçacık salınımını işaret eden herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Isıtıcının yansıtıcı yüzeyinin, testlerden önce ve sonraki durumu karşılaştırmalı fotoğraflar ile Şekil 5.12(a), Şekil 5.12(b) ve Şekil 5.12(c)'de verilmiştir.



Şekil 5.12 Heater bloğunun maksimum sıcaklığa bağlı korozyon durumu: (a) polisajlanıp hiç kullanılmamış; (b) 10 saat maksimum sıcaklıkta sürekli çalıştıktan sonra; (c) 10 saat maksimumda çalışmanın üzerine 5 kez YBCO ince film üretim süreci tamamlandıktan sonra.

Oksijen akışı altında ve oksijen atmosferinde yapılan maksimum sıcaklık testlerinden elde edilen veriler, bir önceki testlerde Argon akışı altında yapılan testler ile karşılaştırıldığında Oksijen gazının geliştirilen halojen alttaş ısıtıcısının sıcaklık performansı üzerinde fark yaratacak bir etkisi gözlenmemiştir. Ayrıca tüm bu testler sırasında vakum odasının iç basıncında herhangi bir değişim olmamıştır ve bu durum, alttaş ısıtıcısının Oksijen gazı altında yüksek sıcaklıklarda vakum odasına herhangi bir salınım yapmadığına işarettir. Şekil 5.12(a), Şekil 5.12(b) ve Şekil 5.12(c) ile verilen fotoğraflardan da görüldüğü gibi, tüm bu performans testleri sonucunda, geliştirilen halojen alttaş ısıtıcısının yansıtıcı yüzeyi oldukça parlaktır ve yansıtma işlevini sorunsuzca yerine getirebilecek düzeyde kalmış, hiçbir önemli korozyona uğramamıştır. Fotoğraflarda görülen, yansıtıcı yüzeydeki mikronluk korozyonlar ise, basit bir polisaj işlemi ile birkaç dakikada giderilebilecek seviyededir.

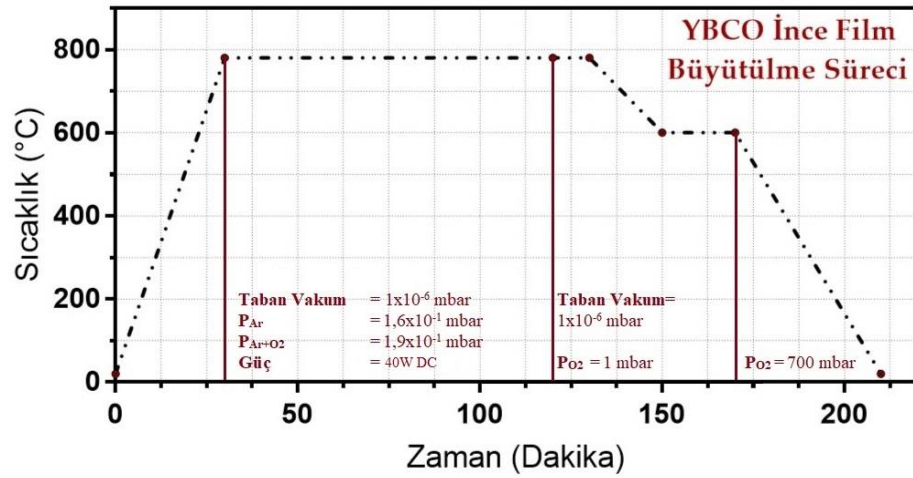
5.4 Süperiletken YBCO Büyütme Süreci

Ultra-yüksek vakumda ve yüksek sıcaklıklarda üretilen oksit kristal ince filmlerin büyütülmesi sürecinde alttaş ısıtıcıları konusunda yaşanan problemlerden dolayı çıkılan bu yolda, YBCO ince film büyütülmesi, geliştirilen

halojen alttaş ısıtıcısının bu amaç için kullanılabilir olduğunu göstermek adına nihai test aşaması olarak belirlenmiştir. Bu aşamada, geliştirilen halojen alttaş ısıtıcısı kullanılarak, DC Magnetron Püskürtme yöntemi ile standart YBCO ince film büyütülmesi süreci uygulanmıştır. Bu işlem için laboratuvar altyapımızda mevcut UHV DC/RF Magnetron Sputter sistemi kullanılmıştır ve üretim parametreleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.13 ile verilmiştir. Bu aşamada, YBCO ile uygun kristal örgü parametrelerinden dolayı daha önceden kullanılmış $\text{LaAlO}_3(100)$ kristali deneme alttaş olarak seçilmiş, standart alttaş temizleme süreci ile temizlenmiş ve üzerine YBCO ince film büyütülmüştür.

Çizelge 5.1 DC magnetron püskürtme yöntemi ile YBCO ince film büyütülme profili

| YBCO Büyütülme Profili | |
|----------------------------|---------------------------|
| Güç | 40 W DC |
| Alttaş Sıcaklığı | 780°C |
| Taban Vakum | 1×10^{-6} mbar |
| P_{Ar} | $1,6 \times 10^{-1}$ mbar |
| $P_{\text{Ar}+\text{O}_2}$ | $1,9 \times 10^{-1}$ mbar |
| Depozisyon Süresi | 90 dakika |
| Oksidasyon Profili | |
| Süre (780°C) | 10 dakika |
| P_{O_2} Akışı | 1 mbar |
| Süre (780°C-600°C) | 20 dakika |
| P_{O_2} Atmosferi | 700 mbar |

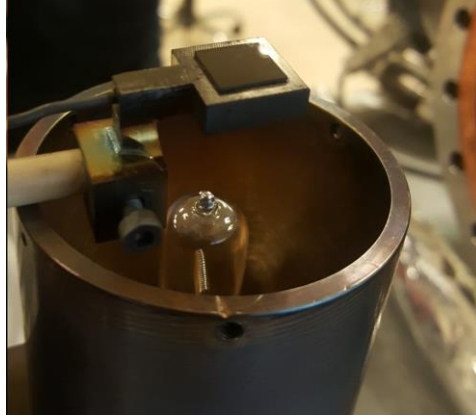


Şekil 5.13 YBCO ince film büyütülme profili



Şekil 5.14 Halojen alttaş ısıtıcısı kullanılarak UHV Multi-target DC/RF Magnetron Sputter sistemi ile YBCO ince film büyütülürken.

Geliştirilen alttaş ısıtıcısı, performansında hiçbir kayıp yaşamadan tüm süreci başarı ile tamamlamıştır. Sonuç olarak LaAlO_3 alttaş üzerinde, fotoğrafı Şekil 5.15 ile verilen, ayna parlaklığında, koyu siyah bir YBCO ince film elde edilmiştir. Böylece hem önceki performans testleri, hem de bu nihai test ile; bu tez çalışması kapsamında geliştirilen halojen alttaş ısıtıcısının, in-situ yöntemler ile süperiletken YBCO ince film büyütülmesine elverişli olduğu gösterilmiştir.



Şekil 5.15 Geliştirilen halojen alttaş ısıtıcısı kullanılarak, magnetron püskürtme yöntemi ile LaAlO_3 (100) alttaş üzerine büyütülen YBCO ince film.

6. SONUÇ

Kristal ince filmlerin in-situ büyütülmesinde kullanılan ticari alttaşı ısıtıcılarında karşılaşılan çok yüksek maliyet, zamanla düşen ısıtma performansı, tamir edilemez şekilde bozulma, vakum odasına parçacık salınımı, ekstra soğutma ekipmanı kullanım ihtiyacı gibi problemleri giderme fikri ile bu tez çalışmasına başlanmıştır. Bu yolda başarıya ulaşabilmek için; çeşitli ticari alttaşı ısıtıcıları incelenmiş ve karşılaşılan problemler önem sırasına göre tespit edilip bu problemlere çözüm getirecek fikirler aranmıştır. Bu aşamada ilk olarak oksit kristal ince filmlerin in-situ büyütülmesindeki zorlu koşullar doğru belirlenip tüm bu koşullarla baş edebilecek materyaller seçilmiştir. Tasarım aşamasında, maliyetleri düşürmek için bu materyaller ile mekanik üretim kolaylığı da gözetilerek en yüksek verimlilik ve çalışma performansını sağlayacak geometrinin seçilmesi üzerine odaklanılmış ve ışınımsal alttaşı ısıtıcılarında enerjinin maksimum verimlilik ile kullanıldığı, yansıtıcı yüzey ile yalnızca alttaşı tutucunun homojen bir şekilde ısıtılacağı bir geometri seçilmiştir. Geliştirilen alttaşı ısıtıcısının ışık kaynağı olarak düşük maliyetli, küçük boyutlarda, yüksek performanslı ve yüksek sıcaklık ve vakum altında reaktif gazlara dirençli olması nedeni ile kuvars tüplü, halojen tip ampul tercih edilmiştir. Bu tip ampuller için satılan ticari duyların iç aksamaları oksit kristal ince filmlerin üretim koşullarına dayanıklı olmadığı için ampulün elektriksel bağlantıları için de ek olarak bu zorlu koşullarda çalışmaya uygun bağlantı parçaları tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan bu halojen alttaşı ısıtıcısının çizim ve montajının bilgisayar ortamında başarıyla tamamlanmasın ardından tasarlanan parçalar işinde yetkin kişiler tarafından CNC torna ve freze sistemleri kullanılarak üretilmiş ve/veya temin edilmiştir. Üretim aşamasından sonra sistemin tasarıma uygun şekilde montajı ve gerekli tüm bağlantıları yapılarak fiziksel testlere hazır hale getirilmiştir.

Performans testleri sürecinde, temel testlerden başlayarak her adımda bir önceki aşamaya göre süreci zorlaştırarak ara süreçlerdeki olası aksaklıkların tespit edilebilmesi amaçlanmıştır. Bundan dolayı sistem önce hava atmosferinde, daha sonra ultra-yüksek vakumda sırası ile Argon ve Oksijen akışında test edilmiş olup sonra da yüksek sıcaklıkta, yoğun Oksijen atmosferinde performans ve korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Test sonuçlarından açıkça görüldüğü üzere tüm bu testlerden hiçbir problem ile karşılaşmadan, başarı ile geçen

halojen alttaş ısıtıcısı son olarak üretiminin nihai amacı olan ‘süperiletken YBCO ince film üretimi’ testine tabi tutulmuştur. Bu aşamada DC magnetron püskürtme yöntemi ile standart süperiletken YBCO ince film büyütülmesi süreci uygulanmış ve yapılan diğer test sonuçlarından da beklendiği gibi, ince film üretim süreci de başarı ile tamamlamıştır.

Bu tez çalışması kapsamında fikir aşamasından başlayarak tasarımı, üretimi ve performans testleri yapılan halojen alttaş ısıtıcısı, performans testlerinden de açıkça görüldüğü üzere bu tez projesinin yapılması fikrinin temelini oluşturan ticari alttaş ısıtıcılarının oksit kristal ince filmlerin in-situ büyütülmesi süreçlerindeki genel problemlerine başarılı çözümler sunmuştur. Sonuç olarak bu çalışma sonucunda, vakum ortamında herhangi bir gaz salınımı yapmayan, ultra-yüksek vakumda ve Oksijen atmosferinde 800°C’yi aşan yüksek sıcaklıklarda çalışmaya elverişli, düşük üretim maliyetine sahip, DC güç kaynağından başka herhangi bir dış kaynak kullanımına ihtiyaç duymayan, kompakt ve profesyonel bir halojen alttaş ısıtıcısı geliştirilmiştir. Tüm bu avantajların yanı sıra sistem, kullanıcıya uzun yıllar boyunca hizmet edebilecek kadar uzun ömürlü olup, zamanla bozulması olası tek parça olan halojen ampul, yaklaşık 5\$ (günümüzde 20-25 TL) gibi bir fiyata tedarik edilebilir ve birkaç dakika gibi kısa bir sürede kolaylıkla değiştirilebilir. Hava atmosferinde yapılan testlerin sonuçlarından da görüldüğü üzere, in-situ süreçlerde kullanılması amacı ile geliştirilmiş bu halojen alttaş ısıtıcısı, aynı zamanda birçok ex-situ ısıl işlem süreçlerinde de güvenle kullanıma uygundur.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Berberich, P., Assmann, W., Prusseit, W., Utz, B., & Kinder, H., 1993, Large area deposition of YBa₂Cu₃O₇ films by thermal co-evaporation, *Journal of Alloys and Compounds*, 195(C), 271–274pp.

Berberich, P., Utz, B., Prusseit, W., & Kinder, H., 1994, Homogeneous high quality YBa₂Cu₃O₇ films on 3" and 4" substrates, *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 219(3–4), 497–504pp.

Berkley, D. D., Johnson, B. R., Anand, N., Beauchamp, K. M., Conroy, L. E., Goldman, A. M., ... Zhang, Y. J., 1988, In situ formation of superconducting YBa₂Cu₃O_{7-x} thin films using pure ozone vapor oxidation, *Applied Physics Letters*, 53(20), 1973–1975pp.

Brüll, P., Kirchgässner, D., & Leiderer, P., 1991, Observation of symmetric patterns in the flux distribution of thin YBa₂Cu₃O_{7-x}films, *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 182(4–6), 339–344pp.

Clark, J. C., Maria, J. P., Hubbard, K. J., & Schlom, D. G., 1997, An oxygen-compatible radiant substrate heater for thin film growth at substrate temperatures up to 1050 °C, *Review of Scientific Instruments*, 68(6), 2538–2541pp.

Estler, R. C., Nogar, N. S., Muenchausen, R. E., Wu, X. D., Foltyn, S., & Garcia, A. R., 1991, A versatile substrate heater for use in highly oxidizing atmospheres, *Review of Scientific Instruments*, 62(2), 437–440pp.

Foley, C. P., Mitchell, E. E., Lam, S. K. H., Sankrithyan, B., Wilson, Y. M., Tilbrook, D. L., & Morris, S. J., 1999, Fabrication and characterisation of ybco single grain boundary step edge junctions, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 9(2 PART 3), 4281–4284pp.

Fukumoto, H., Imura, T., & Osaka, Y., 1989, Heteroepitaxial growth of Y₂O₃films on silicon, *Applied Physics Letters*, 55(4), 360–361pp.

Gross, R., Chaudhari, P., Kawasaki, M., Ketchen, M. B., & Gupta, A., 1990, Low noise YBa₂Cu₃O_{7-δ} grain boundary junction dc SQUIDS, *Applied Physics Letters*, 57(7), 727–729pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Gupta, A., & Hussey, B. W., 1991, Laser deposition of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films using a pulsed oxygen source, *Applied Physics Letters*, 58(11), 1211–1213pp.

Gupta, A., Hussey, B. W., & Chern, M. Y., 1992, Effect of different oxidizing gases on the in-situ growth of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films by pulsed laser deposition, *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 200(3–4), 263–270pp.

Hirai, T., & Yamane, H., 1991, MOCVD superconducting oxide films, *Journal of Crystal Growth*, 107(1–4), 683–691pp.

Iijima, Y., Tanabe, N., Kohno, O., & Ikeno, Y., 1992, In-plane aligned $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films deposited on polycrystalline metallic substrates, *Applied Physics Letters*, 60(6), 769–771pp.

Jiang, Q. D., Maticotta, F. C., Konijnenberg, M. C., Müller, G., & Schultheiss, C., 1994, Deposition of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films by channel-spark pulsed electron beam ablation, *Thin Solid Films*, 241(1–2), 100–102pp.

Kang, J., Kim, H., Kim, K. S., Lee, S. K., Bae, S., Ahn, J. H., ... Hong, B. H., 2011, High-performance graphene-based transparent flexible heaters, *Nano Letters*, 11(12), 5154–5158pp.

Kelly, P. J., & Arnell, R. D., 2000, 235623.Pdf, 56, 159–172pp.

Kington, A. I., Auciello, O., Ameen, M. S., Rou, S. H., & Krauss, A. R., 1989, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ films deposited by a novel ion beam sputtering technique, *Applied Physics Letters*, 55(3), 301–303pp.

Lathrop, D. K., Russek, S. E., & Buhrman, R. A., 1987, Production of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ superconducting thin films in situ by high-pressure reactive evaporation and rapid thermal annealing, *Applied Physics Letters*, 51(19), 1554–1556pp.

Lorenz, M., Hochmuth, H., Natusch, D., Börner, H., Lippold, G., Kreher, K., & Schmitz, W., 1995, Large-area double-side pulsed laser deposition of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films on 3-in. sapphire wafers, *Applied Physics Letters*, 3332(November 1995), 3332pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Low, B. L., Xu, S. Y., Ong, C. K., Wang, X. B., & Shen, Z. X., 1997, Substrate temperature dependence of the texture quality in YBCO thin films fabricated by on-axis pulsed-laser ablation, *Superconductor Science and Technology*, 10(1), 41–46pp.

Madakson, P., Cuomo, J. J., Yee, D. S., Roy, R. A., & Scilla, G., 1988, Processing of $\text{La}_{1.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CuO}_4$ and $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ superconducting thin films by dual-ion-beam sputtering, *Journal of Applied Physics*, 63(6), 2046–2053pp.

Manthiram, A., Swinnea, J. S., Sui, Z. T., Steinfink, H., & Goodenough, J. B., 1987, The Influence of Oxygen Variation on the Crystal Structure and Phase Composition of the Superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, *Journal of the American Chemical Society*, 109(22), 6667–6669pp.

Marré, D., Diaspro, A., Ferdeghini, C., Grassano, G., Pallecchi, I., & Siri, A. S., 1998, Two-dimensional growth of atomically smooth YBCO epitaxial films deposited by PLD in a pulsed oxygen flow, *Superconductor Science and Technology*, 11(8), 737–743pp.

Okunev, V. D., Samoilenko, Z. A., Svistunov, V. M., Abal'oshev, A., Dynowska, E., Gierłowski, P., ... Lewandowski, S. J., 1999, Amorphous state and pulsed laser deposition of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films, *Journal of Applied Physics*, 85(10), 7282–7290pp.

Poppe, U., Schubert, J., Arons, R. R., Evers, W., Freiburg, C. H., Reichert, W., ... Urban, K., 1988, Direct production of crystalline superconducting thin films of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ by high-pressure oxygen sputtering, *Solid State Communications*, 66(6), 661–665pp.

Roas, B., Schultz, L., & Endres, G., 1988, Epitaxial growth of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films by a laser evaporation process, *Applied Physics Letters*, 53(16), 1557–1559pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Schurig, T., Menkel, S., Quan, Z., Beyer, J., Güttler, B., Knappe, S., & Koch, H., 1996, Large-area YBCO thin film deposition using linear hollow cathode discharge sputtering, *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 262(1–2), 89–97pp.

Simon, R. W., Platt, C. E., Lee, A. E., Lee, G. S., Daly, K. P., Wire, M. S., ... Urbanik, M., 1988, Low-loss substrate for epitaxial growth of high-temperature superconductor thin films, *Applied Physics Letters*, 53(26), 2677–2679pp.

Terashima, T., Bando, Y., Iijima, K., Yamamoto, K., & Hirata, K., 1988, Epitaxial growth of YBa₂Cu₃O_{7-x} thin films on (110) SrTiO₃ single crystals by activated reactive evaporation, *Applied Physics Letters*, 53(22), 2232–2234pp.

Wang, L. M., Yu, H. W., Yang, H. C., & Horng, H. E., 1996, Optimum sputtering conditions on the in-situ growth of superconducting YBa₂Cu₃O_y films with an off-axis RF sputtering configuration, *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 256(1–2), 57–63pp.

Watanabe, T., Kuriki, R., Iwai, H., Muroga, T., Miyata, S., Ibi, A., ... Shiohara, Y., 2005, High rate deposition by PLD of YBCO films for coated conductors, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15(2 PART III), 2566–2569pp.

Weeks, J. D., & Gilmer, G. H., 2007, Dynamics of Crystal Growth, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 157–228pp.

Yang, W., Chen, G., Shi, Z., Liu, C. C., Zhang, L., Xie, G., ... Zhang, G., 2013, Epitaxial growth of single-domain graphene on hexagonal boron nitride, *Nature Materials*, 12(9), 792–797pp.

ÖZGEÇMİŞ

İzmir, 1991 doğumlu Emir ARIK, ilk ve orta öğrenimini İzmir’de tamamladıktan sonra yükseköğrenimini Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü lisans programında tamamlamıştır. Yüksek Lisans eğitimine 2015 yılında Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Genel Fizik Anabilimdalı altında başlamış ve bu tez çalışması ile 2019 Ocak ayında bu yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır.

