

**Süperiletken Metamalzeme Temelli Terahertz
Band-geçirgen Filtreleri**

Program Kodu: 1001

Proje No: 114F091

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Lütfi ÖZYÜZER

Araştırmacı(lar):

Doç. Dr. Hakan ALTAN

Doç. Dr. Cumali SABAH

Danışman(lar):

Bursiyer(ler):

Mehmet Ali Nebioğlu

Ece Meriç

Metin Kurt

KASIM 2016

İZMİR

ÖNSÖZ

Bu proje sayesinde 3 kurum, İYTE, ODTÜ ve ODTÜ Kıbrıs üniversiteleri yakın bir iş birliği yapma fırsatı yakalamış ve uluslararası alanda özgün bir çalışma yapmıştır.

Yüksek lisans öğrencisi olan ve tez çalışmalarını bu proje ile tamamlayan Mehmet Ali Nebioğlu'na, Doktora öğrencisi olan ve tez çalışmalarını bu proje ile devam ettiren Araştırma Görevlisi Yasemin Demirhan'a, Araştırma Görevlisi Hakan Alaboz'a ve Doktora öğrencisi Batuhan Mulla'ya proje kapsamında yürütülmesi gereken deneysel ve nümerik çalışmaları yapmış olduklarından dolayı teşekkür ederiz.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TUBİTAK) 114F091 no'lu bu projeye maddi olarak yapmış olduğu katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

İçindekiler

1. TERAHERTZ DALGABOYU.....	1
2. THZ DALGABOYUNDA ÇALIŞAN METAMALZEME FİLTRELER	2
3. MOTİVASYON	6
4. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\Delta}$ (Bİ2212)'NİN YAPISI	7
5. DENEYSEL YÖNTEMLER.....	8
5.1 ELEKTRON DEMETİ LİTOGRAFİSİ	8
6. METAMALZEME TASARIMI VE ÖLÇÜMLERİ.....	11
6.1 METAL-AĞ BAND GEÇİRGEN FİLTRELERİN TASARIMI & ÜRETİMİ.....	11
6.2 METAL-AĞ BAND GEÇİRGEN FİLTRELERİN TERAHERTZ ZAMANA DAYALI SPEKTROSKOPİSİYLE KARAKTERİZASYONU (ODTÜ)	14
6.3 METAL-AĞ BAND GEÇİRGEN FİLTRELERİN FOURİER DÖNÜŞÜMLÜ KIZİLÖTESİ SPEKTROSKOPİSİ (FTİR) İLE KARAKTERİZASYONU (İYTE).....	18
7. METAMALZEME FİLTRE FABRİKASYONU & SİMULASYONU	21
7.1 İNCE FİLM KAPLAMA & ELEKTRON DEMETİ LİTOGRAFİSİ İLE ŞEKİLLENDİRME .21	
7.2. MODELLEME, SİMÜLASYON & ÖLÇÜMLER.....	22
7.3. ALTERNATİF YAPILAR	28
8. Bİ2212 İNCE FİLM KAPLAMA ÇALIŞMALARI	33
8.1 Bİ2212 HEDEF HAZIRLAMA İŞLEMLERİ	33
8.2 Bİ2212 İNCE FİMLERİNİN BÜYÜTÜLMESİ	37
8.3 Bİ2212 İNCE FİMLERİN KARAKTERİZASYONU	41
8.3.1 TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU GÖRÜNTÜLERİ.....	42
8.3.2 XRD ANALİZİ SONUÇLARI.....	45
8.3.3 Bİ2212 İNCE FİMLERİNİN DİRENÇ-SICAKLIK (R-T) ÖLÇÜMLERİ	50
9. YBCO KUADKROSS	64
10. YBCO KROSS YAPISI.....	67
11. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	76

Şekiller listesi

Şekil 1. Farklı metamalzeme tasarımları (Claire M. Watts vd., 2012).	4
Şekil 2. Fishnet yapısının şematik gösterimi (Tutorials in Metamaterials, Mikhail A. Noginov)	5
Şekil 3. Çok katmanlı modelde Bi2212 yapısı	8
Şekil 4. Elektron demeti litografisi sistemimiz	10
Şekil 5. Temiz oda sürecinin şematik gösterimi	10
Şekil 6. İyon demeti aşındırma sisteminin şematik gösterimi	10
Şekil 7. Filtre ve alttaşın boyutlarının CST simülasyon programındaki tasarımı	11
Şekil 8. Bakır filtrenin fused silika alttaş üzerinde simülasyonu	12
Şekil 9. Bakır filtrenin boşlukta simülasyonu	12
Şekil 10. Ürettiğimiz Metal ağ bant geçiren filtrelerin optik mikroskop görüntüleri (Demirhan vd., 2016)	13
Şekil 11. ODTÜ’de bulunan TDS sisteminin şematik gösterimi.	15
Şekil 12. Fused Silika üzeri büyütülmüş Titanyum ince filminin THz-TDs sonuçları	16
Şekil 13. Fused Silika üzeri büyütülmüş Bakır ince filminin THz-TDs sonuçları	16
Şekil 14. Fused Silika üzeri büyütülmüş Bakır incefilminin THz-TDs sonuçları ve simülasyon sonuçları	17
Şekil 15. Fused Silika üzeri büyütülmüş Bakır incefilminin THz-TDs sonuçları ve simülasyon sonuçları	17
Şekil 16. Ti, ITO ve Cu filtrelerinin FTIR sonuçları (Demirhan vd., 2016)	19
Şekil 17. Bakır temelli filtrelerin FTIR sonuçları (Demirhan vd., 2016)	20
Şekil 18. YBCO incefilmi üzerine ürettiğimiz metal ağ filtrenin optik mikroskop görüntüsü	20
Şekil 19. Tasarladığımız ilk kuadkross metamalzeme filtrenin üretim sonrası optik mikroskop görüntüleri	22
Şekil 20. Tasarlanan ilk metamalzeme filtrenin şematik görüntüleri	22
Şekil 21. Tasarlanan kuadkross filtrenin simülasyon sonucu: li ye bağlı rezonanstaki değişim	23
Şekil 22. Tasarlanan kuadkross filtrenin simülasyon sonucu: gi ye bağlı rezonanstaki değişim	24
Şekil 23. Tasarlanan kuadkross filtrenin simülasyon sonucu: Alttaş kalınlığına bağlı rezonanstaki değişim	24
Şekil 24. Filtre ve alttaşın boyutları yukarıda belirtilmiştir.	25
Şekil 25. Au Kare rezonatörün boşlukta yapılmış simülasyonu	26
Şekil 26. Au Kare rezonatörün fused silika üzerinde yapılmış simülasyonu	26
Şekil 27. Kare rezonatörün TE (0,0) mode altında boşlukta elektrik alan dağılımı.	26
Şekil 28. Kare rezonatörün TE(0,0) modu altında fused silika alttaş üzerinde elektrik alan dağılımı.	27
Şekil 29. Au kare rezonatörün TDS ölçümü	27
Şekil 30. Au kare rezonatörün TDS ölçümü	27
Şekil 31. Krom kare rezonatörün boşlukta simülasyonu	28
Şekil 32. Krom kare rezonatörün alttaş üzerinde yapılmış simülasyonu	28
Şekil 33. Krom kare rezonatörün TDS ölçümü	28
Şekil 34. Krom kare rezonatörün TDS ölçümü	28
Şekil 35. Kare elektrik ring resonatör ve alttaşın boyutları.	29
Şekil 36. Kare elektrik rezonatörün boşlukta yapılmış simülasyonu	29
Şekil 37. Kare rezonatörün fused silika üzerinde yapılmış simülasyonu	29
Şekil 38. Kare elektrik rezonatörün TE (0,0) mode altında boşlukta elektrik alan dağılımı.	30
Şekil 39. Kare elektrik rezonatörün TE(0,0) modu altında fused silika alttaş üzerinde elektrik alan dağılımı.	30
Şekil 40. Tasarlanan ikinci model metamalzeme filtrenin üretim sonrası optik mikroskop görüntüleri	31
Şekil 41. Kare elektrik ring resonatör ve alttaşın boyutları.	31
Şekil 42. Kare elektrik rezonatörün boşlukta yapılmış simülasyonu	32
Şekil 43. Kare rezonatörün fused silika üzerinde yapılmış simülasyonu	32
Şekil 44. Kare elektrik rezonatörün TE (0,0) mode altında boşlukta elektrik alan dağılımı.	32

Şekil 45. Kare elektrik rezonatörün TE(0,0) modu altında fused silika alt taş üzerinde elektrik alan dağılımı.	33
Şekil 46. Elde edilen homojen toz ve alümina kayık pota	33
Şekil 47. Kalsinasyon ısıl işleminin sıcaklık zaman çizelgesi	34
Şekil 48. Alimuna kap içerisinde kalsin edilmiş toz ve tablet basma kalıbı	35
Şekil 49. Tablet sertleştirme işleminin sıcaklık zaman çizelgesi	35
Şekil 50. Üretilen Bi2212 hedefin fotoğrafı	35
Şekil 51. Üretilen Bi2212 hedefin bakır metal kap içinde birleştirilmiş halinin kaplama öncesi fotoğrafı	36
Şekil 52. Üretilen Bi2212 hedefin bakır metal kap içinde birleştirilmiş halinin 60 örnek kaplama sonrası fotoğrafı	36
Şekil 53. DC ve RF magnetron sputtering sistemimiz	37
Şekil 54. RF magnetron sputtering sisteminde kullandığımız satın alınan Bi2212 hedef	38
Şekil 55. Bi2212 Hedef (PLD sistemi için hazırlanan)	38
Şekil 56. Atatürk Üniversitesinde bulunan Complete P180 PLD Sistemi	39
Şekil 57. PLD sistemi ile kaplanan örneklerin resimleri	41
Şekil 58. Hazırlanan Bi2212 hedefinin SEM görüntüsü	42
Şekil 59. YD37 örneğinin SEM görüntüsü (30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı)	42
Şekil 60. YD39 örneğinin SEM görüntüsü (50 sccm Argon 2.5 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı)	43
Şekil 61. YD 48 örneğini SEM görüntüsü (120 sccm Argon 30 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı)	43
Şekil 62. Hazırlanan Bi2212 hedefin XRD analiz sonucu	46
Şekil 63. Referans olarak kullanılan c-ekseni boyunca büyütülen Bi2212 filmlerin XRD analizi (Endo vd., 1992)	46
Şekil 64. YD 10 örneğinin XRD analiz sonucu(50 sccm Argon 20 sccm Oksijen gönderilerek 1.5 saat kaplama yapıldı).	47
Şekil 65. YD 17 örneğinin XRD analiz sonucu (30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 2 saat kaplama yapıldı).	47
Şekil 66. YD 22 örneğinin XRD analiz sonucu (20 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı).	48
Şekil 67. YD 25 örneğinin XRD analiz sonucu (30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı).	48
Şekil 68. YD 28 örneğinin XRD analiz sonucu (30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 5.5 saat kaplama yapıldı).	49
Şekil 69. YD 31 örneğinin XRD analiz sonucu (50 sccm Argon 12.5 sccm Oksijen gönderilerek 5 saat 50 dk kaplama yapıldı)	49
Şekil 70. YD 32 örneğinin XRD analiz sonucu (100 sccm Argon 25 sccm Oksijen gönderilerek 1.5 saat kaplama yapıldı).	50
Şekil 71. Kapalı devre Helyum ile R-T ölçüm sistemi	51
Şekil 72. Hazırlanan Bi2212 hedefin R-T ölçümü grafiği	51
Şekil 73. Oksijen geçişli tavlama düzeneğinin resmi	52
Şekil 74. Tavlama düzeneğinin sıcaklık-zaman grafiği	53
Şekil 75. YD 25 örneğinin R-T ölçümü grafiği (30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı).	53
Şekil 76. YD 27 örneğinin R-T ölçümü grafiği (30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı).	54
Şekil 77. YD 37 örneğinin R-T ölçümü grafiği (Tavlama öncesi)(30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı).	54
Şekil 78. YD 37 örneğinin R-T ölçümü grafiği (Tavlama sonrası) (30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı)	55
Şekil 79. YD 56 örneğinin R-T ölçümü grafiği (Isınırken ve soğurken) (120 sccm Argon 30 sccm Oksijen gönderilerek 2 saat 15 dakika kaplama yapıldı).	55
Şekil 82. a) Safir üzeri artı şekilli metalmalzeme	57
b) Safir üzeri kuadkross şekilli metalmalzeme	57

Şekil 83. Ölçümler esnasında kullanılan soğuk kafa.	60
Şekil 84. Örnek tutucu, kompresör ve pompa.	60
Şekil 85. Zaman uzayı vs terahertz elektrik alan değerleri	61
Şekil 86. Sıcaklık vs terahertz tepe değerleri	61
Şekil 87. Zaman, elektrik alan grafiği	62
Şekil 88. YBCO kuadkross yapısının boyutları	65
Şekil 89. YBCO kuadkross yapısının farklı sıcaklıklarda ve terahertz bölgesinde güç geçişi simülasyonu	66
66	
Şekil 90. YBCO kuadkross yapısının farklı sıcaklıklarda ve terahertz bölgesinde güç geçişi deneyi	66
Şekil 91. Altın KuadKross yapısının farklı sıcaklıklarda terahertz bölgesi güç geçişi deneyi	67
Şekil 92. Altın KuadKross Yapısının farklı sıcaklıklarda terahertz bölgesi güç geçişi simülasyonu	67
Şekil 93. YBCO kross yapısının boyutları	68
Şekil 94. YBCO cross yapısının farklı sıcaklıklarda terahertz bölgesi güç geçişi deneyi	68
Şekil 95. YBCO cross yapısının farklı sıcaklıklarda terahertz bölgesi güç geçişi simülasyonu	68
Şekil 96. YBCO kuadkross yapısının MgO substrate üzerinde boyutları	69
Şekil 97. Altın kuadkross yapısının MgO substrate üzerinde simulasyon sonuçları	69
Şekil 98. YBCO kuadkross yapısının MgO substrate üzerinde simulasyon sonuçları	69
Şekil 97. YBCO kuadkross yapısının LaAlO ₃ alttaş üzerinde boyutları	70
Şekil 100. Altın kuadkross yapısının MgO alttaş üzerinde simulasyon sonuçları	70
Şekil 101. YBCO kuadkross yapısının LaAlO ₃ alttaş üzerinde simulasyon sonuçları	70
Şekil 102. Altın üçgen yapısının boyutları fused silika	71
Şekil 103. Fused silika üzeri altın üçgen metamatzemenin simülasyon sonucu	71
Şekil 104. Altın üçgen yapısının boyutları MgO	72
Şekil 105. Altın üçgen yapısının MgO üzerinde simülasyonu	72
Şekil 106. YBCO üçgen yapısının MgO üzerinde farklı sıcaklıklarda simülasyonu	72
Şekil 107. YBCO kuadkross yapısının Y değeri 2, 2.08 ve 4 alınarak tekrarlanan 20 K'deki simülasyon sonucu.	73
Şekil 108. YBCO kuadkross yapısının Y değeri 2, 2.08 ve 4 alınarak tekrarlanan 40 K'deki simülasyon sonucu.	74
Şekil 109. YBCO kuadkross yapısının Y değeri 2, 2.08 ve 4 alınarak tekrarlanan 60 K'deki simülasyon sonucu.	74
Şekil 110. YBCO kuadkross yapısının Y değeri 2, 2.08 ve 4 alınarak tekrarlanan 70 K'deki simülasyon sonucu.	75
Şekil 111. YBCO kuadkross yapısının Y değeri 2, 2.08 ve 4 alınarak tekrarlanan 80 K'deki simülasyon sonucu.	75
Şekil 112. YBCO kuadkross yapısının Y değeri 2, 2.08 ve 4 alınarak tekrarlanan 84 K'deki simülasyon sonucu.	76

TABLOR LİSTESİ

Tablo 1. Hazırladığımız örneklerin incelik ve R_s değerleri	13
Tablo 2. Literatürdeki Bi2212/MgO parametreleri.....	40
Tablo 3. Üretilen ve satın alınan Bi2212 hedeflerin EDX analizi	44
Tablo 4. Farklı parametrelerle kaplanan Bi2212 ince filmlerinin EDX analizi	44
Tablo 5. Aynı parametrelerle farklı alttaşlara kaplanan Bi2212 incefilmlerinin EDX analizi	45

ÖZET

Bu projede süperiletken filmlerinden terahertz dalgaboyunda çalışabilen metamalzeme filtreler yapılması amaçlanmıştır. Öncelikle nümerik simülasyonlarla Terahertz aralığında çalışan metal ve süperiletken metamalzeme filtreler tasarlanmıştır. Tasarlanan ve modellenen filtreler, fused silika alttaşlar üzerine büyütülmüş Au ve Cr ince filmler üzerinde şekillendirilmiştir ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsünde bulunan Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ile karakterize edilmiştir. Daha sonra ODTÜ'de filtrelerin Terahertz zamana dayalı spektroskopisiyle ölçümleri alınmıştır. Bu çalışmalar raporda detaylı olarak verilmiştir. Filtre tasarım ve üretimine paralel olarak süperiletken $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ (Bi2212) ince filmlerinin büyütülme çalışmaları yapılmıştır. Bi2212 ince filmleri c düzlemlü (0001) safir ve MgO alttaş üzerine (Bi2212) hedef stokiyometrik oranlardaki Bi_2O_3 , SrCO_3 , CaCO_3 ve CuO tozlarından kalsinasyon, presleme ve sinterleme işlemleriyle hazırlanmıştır.) prosedürleri detaylı bir şekilde belirtilen kendi hazırladığımız hedef ve satın alınan hedef ile DC ve RF güç kaynağı ile farklı parametrelerde büyütülmüştür. İki farklı hedef ile büyütülen örnekler karşılaştırılmıştır. Yapısal karakterizasyon için ince filmlerin EDX (Enerji Dağılımlı X-ışınları Mikroanaliz Spektrometresi) ve XRD (X-ışını difraksiyon spektroskopisi) analizleri yapılmıştır. Bi2212 ince filmlerinin Taramalı Elektron Mikroskobu ile SEM görüntüleri alınmıştır. Üretilen hedef ve büyütülen filmlerin direnç sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Bu çalışmalar da raporda detaylı olarak verilmiştir. Proje için özgün kuadkross metamalzeme filtre yapısı tasarlanmış ve hem altın hem YBCO ince film üzerine üretilmiştir. Kuadkross metamalzeme filtrelerin geçirgenlik özelliklerini THz zamana dayalı spektroskopisi ile kapalı He kroyostat sisteminde ölçülmüştür. Sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmış, projede çalışan her üç araştırma grubunun öğrencileri ve araştırmacı öğretim üyeleri projenin devam ettiği 2 yıl boyunca düzenli olarak İzmir, Kıbrıs ve Ankara'da toplanmış ve projenin durumu ve sonuçlar hakkında fikir alışverişinde bulunmuştur.

Bu proje ile ilgili yapılan çalışmalar Tera-Mir 2015, Şişecam 2015, IPCAP 2016, CLEO/Europe 2015, Quantum Metrology 2016, SMMO 2016, SATF 2016, Şişecam 2016 konferanslarında bildiri olarak sunulmuştur. Ayrıca SCI tarafından taranan Opt. Quant. Electron. dergisinde makale basılmış (Y. Demirhan vd., 2016) ve diğer bir çalışmada yine aynı dergide (C. Sabah vd. 2016) kabul edilmiş ve yayımlanmıştır. Yine SCI tarafından taranan Modern Physics letters B. (M. Ali Nebioğlu vd) ve Superconducting Science and Technology (Y. Demirhan vd.) dergilerine 2 farklı makale gönderilmiştir, bu makaleler hakem değerlendirmesindedir.

ABSTRACT

In this project, it is aimed to fabricate metamaterial filters from superconducting films that works in terahertz region. Firstly, metal and superconducting metamaterial filters working in terahertz range are designed with the help of numerical simulations. Designed and modelled filters are patterned on Au and Cr thin films grown on fused silica substrates and are characterized by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) at İzmir Institute of Technology. Then, measurements were taken at ODTÜ with the Terahertz time domain spectroscopy. These studies are given in detail in the report. In parallel with the filter design and fabrication processes, deposition studies of superconducting $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ (Bi2212) thin films have been carried out.

Bi2212 thin films are grown with different parameters on the c-plane (0001) sapphire and MgO substrates by DC and RF power sources with self-prepared target, the procedure is described in detail (Bi2212 target were prepared by calcination, pressing and sintering processes from Bi_2O_3 , SrCO_3 , CaCO_3 and CuO powders at stoichiometric ratios.), and a commercial target,. The deposited samples with two different targets were compared. EDX (Energy Diffraction X-Ray Microanalysis Spectrometry) and XRD (X-ray diffraction spectroscopy) analyzes of thin films were performed for structural characterization. SEM images of Bi2212 thin films were taken by scanning electron microscope. Resistance temperature measurements of the prepared target and deposited thin films were taken. These studies are also given in detail in the report. A unique quadcross metamaterial filter structure was designed for the project and fabricated on both gold and YBCO thin films. The transmission characteristics of the quadcross metamaterial filters were measured in the closed cycle He cryostat system by THz time-domain spectroscopy. The obtained results were compared with each other and the students and researcher scientists of all three research groups working in the project gathered regularly in İzmir, Cyprus and Ankara for 2 years during the continuation of the project and exchanged ideas about the status and results of the project.

The studies in this project has been presented in the conferences of Tera-Mir 2015, Şişecam 2015, IPCAP 2016, CLEO / Europe 2015, Quantum Metrology 2016, SMMO 2016, SATF 2016, Şişecam 2016. Also an article is published in the Journal of Opt. Quant. Electron. that is scanned by SCI. (Y. Demirhan vd. 2016), and in another study it was accepted and published in the same journal (C. Sabah et al, 2016). Two different articles have been submitted to SCI expanded Modern Physics letters B. (M. Ali Nebioğlu et al.) and

Superconducting Science and Technology (Y. Demirhan et al.), these articles are of the referee evaluation.

1. TERAHERTZ DALGABOYU

Elektromanyetik spektrumun 0.3 ile 10 THz frekans aralığındaki bölge Terahertz dalgaları veya T-ışını (THz) olarak adlandırılır. Terahertz dalgaboyunun düşük foton enerjisi (1 THz=4.1 meV) X-ışının sahip olduğu enerjinin milyonda biri kadardır. İnsan vücuduna temas ettiği zaman atomları iyonlaştırmadığından biyolojik dokular zarar görmez. THz dalgalarının kullanımı görüntüleme ve spektroskopi uygulamalarıyla biyoloji ve tıbbi teşhis, terörizm ve kaçakçılığa karşı saptama, doğal ve endüstriyel sensörler, savaş alanı gözetleme, hava alanı iniş sistemleri, kimyasal savaş maddeleri saptanması, görüntülenmesi ve hava alanı güvenliği gibi geniş bir alanı kapsar (Kawase vd., 2004; Tonouchi vd., 2007; Ozyuzer vd., 2007). Halen çoğunlukla “THz” gap olarak nitelendirilen bölgede aktif veya pasif çok sayıda cihaz bulunmaktadır. Terahertz dalga boylarına dayalı teknolojiler günümüzde hızla gelişmektedir. Son yıllarda en önemli gelişmelerden biri terahertz iletişim teknolojileri alanında görülmektedir. Özellikle batı ülkelerde terahertz frekanslarına doğru iletişim bantların açılacağı yönünde gelişmeler gerçekleşmektedir. Ülkemizdeki bazı yerel firmalar, şimdiden milimetre dalga boylarında (<100 GHz) alıcı verici sistemleri geliştirip cep telefonu kullanıcıları için mevcut iletişim ağlarını bu sistemleri entegre etme çabalarına girişmişlerdir. Bu yoğun ilgi ortamında terahertz ve milimetre dalga boyu teknolojilerine dayalı pasif ve aktif aygıtların geliştirilmesinin önemi hızla artmaktadır. Son yıllarda, özellikle ülkemizde, yarı-iletken aygıtlara dayalı mikro-ölçekli üretim teknikleri hızla gelişmektedir. Bununla beraber dünyada terahertz alanında bu teknikleri kullanarak terahertz ışınlarını etkileyen birçok farklı aygıt geliştirilme çabaları başlamıştır ve bunlardan başarılı örneklerden biri diğer kısa dalga boylarına göre üretim kolaylığı açısından metamalzeme yapılarıdır. Terahertz (THz) bölgesi (0.3 ve 10 THz), genellikle THz boşluğu olarak adlandırılmış olup malzemelerin birçok doğal titreşim frekansını barındırmasına rağmen, bu bölgede çalışan verimli aygıt, dedektör ve bileşenlerin bulunmaması THz bölgesini keşfedilmemiş kılmaktadır. Terahertz teknolojisinde metamalzeme, doğal malzemelerden elde edilemeyen elektromanyetik özellikler gösterdiği ve istenen fonksiyonellikte tasarlanabildiğinden, yapay optik elemanların tasarımında önemli bir yere sahiptir. Son yıllarda elektromanyetik spektrumunun farklı frekanslarında çeşitli uygulamalar için metamalzeme alanında çok fazla araştırma yapılmış ve bu çalışmalar büyük ilgi görmüştür. Ancak uygulama alanlarındaki başarı oranı malzemelerin kayıplara olan hassasiyetine bağlıdır. Metamalzeme geometrik olarak ölçeklendirilebilirler ve böylece radio, mikrodalga, milimetre-dalga, uzak infrared (FIR), orta infrared (MIR), yakın infrared (IR) frekanslarında ve hatta görünür dalga boylarını kapsayan geniş bir frekans aralığında çalışabilirler. Terahertz

boşluğu elektronik ve fotonik alanların arasında geçiş bölgesi olarak düşünülebilir, metamalzeme yapıları frekans ayarlı olduğundan kolayca mikrodalgadan THz bölgesine çekilebilir. Analitik, nümerik ve deneysel yaklaşımlarla, özgün metamalzeme etkileri ve süperiletken-temelli metamalzemeler konusunda birçok bilimsel araştırma yapılmış ve yayınlanmıştır. Metamalzemelerin farklı terahertz frekanslarında gösterdikleri rezonant etkiler özellikle dedektör ve spektroskopik yöntemler açısından son derece önemli bir yer edinmeye başlamıştır. Bununla beraber son yıllarda geliştirdiğimiz yüksek sıcaklıkta çalışan süperiletken malzemelere dayalı aygıtlar terahertz dalga boylarında yeni bir teknoloji geliştirme alanı yaratmıştır.

2. THZ DALGABOYUNDA ÇALIŞAN METAMALZEME FİLTRELER

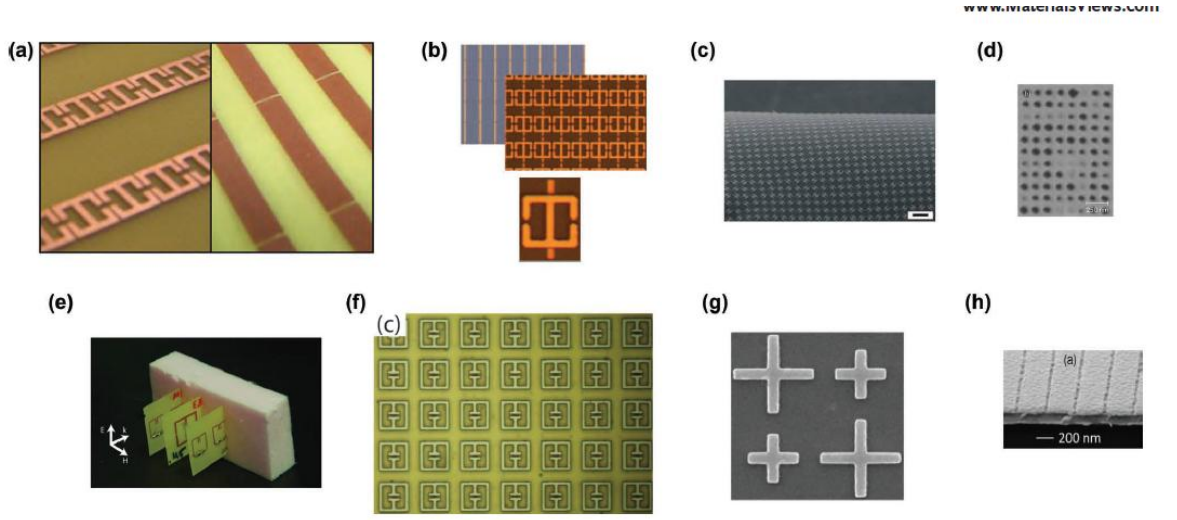
Metamalzeme cihazlarının fabrikasyonunda genellikle dielektrik/normal metal yapılar tercih edilmiştir (Chen 2006, Chen 2009, Shelby 2001). Alternatif olarak birçok araştırmada periodik fotonik kristal yapılarının da negatif kırılma indisli malzemeler için potansiyel oluşturduğu gözlemlenmiştir. İletken elemanlı metamalzemeler başarılı bir şekilde negative kırılma gösterebilmiştir. Fakat yüksek frekanslara gidildikçe, özellikle optik bölgelerde bu metamalzemelerden yapılan aygıtlarda problem yaşanabilmektedir. Metamalzemelerin, dalgaboyundan daha küçük tasarımları ve verimli çalışmaları beklenirken, önemli kayıplar yüzünden MM aygıtların uygulama alanları sınırlandırılmıştır. Mikrodalga aralığında bu kayıp azdır ve elektromanyetik özellikler hala sağlanabilir. Daha yüksek frekanslara gidildikçe, terahertz bölgesinde kayıplar hızla artmaya başlar ve elektromanyetik özellikleri olumsuz etkiler. Terahertz bölgesinde düşük kayıpla çalışabilen uygulanabilir metamalzemelere gereksinim duyulmaktadır. THz frekans aralığında ohmik kayıplar bu malzemelerin performansını sınırlandırır. Bunun üstesinden gelebilecek malzemeler süperiletkenlerdir.

Kamerlingh Onnes (Onnes, 1911) tarafından belirli sıcaklığın altında sıfır dirence sahip olan, dolayısıyla enerji kayıplarını engelleyen, ve aynı zamanda kusursuz diyamanyetik özellik gösteren süperiletken malzemelerin bulunması ilgiyi bu malzemelere çekmiştir. Dirençsiz/kayıpsız olarak elektrik akımını iletmeleri ve yüksek frekanslarda bile çok düşük direnç göstermeleri devre elemanları üzerinde, daha geniş anlamda devrelerde/cihazlarda ısınma problemini de ortadan kaldırmaktadır. 1986 yılı ve sonrasında yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin bulunması ve sıvı azottan (77 K) daha yüksek sıcaklıklarda süperiletkenliğin gözlenmesini teknolojik alanlardaki kullanımı yaygınlaştırmıştır. Genellikle bu

malzemeler perovskit yapısındadır. Miknatıssal saçtırma, vakumda buharlaştırma, kimyasal buhar biriktirme ve metal organik kimyasal buhar biriktirme teknikleri Bi2212 yüksek sıcaklık süperiletken ince filmlerinde büyütme yöntemi olarak denenmiştir (Yamasaki, 2014; Wild 1998). Süperiletkenler normal metallerde bulunmayan birçok elektromanyetik özelliğe sahiptir ve bu özellikler neredeyse ideal ve özgün metamalzeme yapımında kullanılabilir. Önceki çalışmalarda THz frekansında ve GHz frekansında çalışan metamalzemelerdeki kayıpların metal yapılar süperiletken yapılarla değiştirildiğinde büyük ölçüde azaldığı ispatlanmıştır (Ricci, 2005). Metallerin aksine süperiletkenlerdeki kompleks iletkenlik özelliğe manyetik alana, sıcaklıkla ve uygulanan optik alanlarla değişir. Süperiletken elemanların iletkenliği kontrol edilerek ek elemanlara ihtiyaç duyulmadan aktif metamalzeme yapılar (Ricci, 2007; Zhang, 2012; Chen, 2010; Savinov, 2012) üretmek mümkündür. Ayrıca düşük sıcaklıklarda süperiletkenler üstün iletkenlik gösterirler ve quantum davranış gösteren elemanları entegre etmek mümkündür. Yüzey dirençleri mikrodalga frekanslarında düşüktür. Tip 2 süperiletkeni Nb 2 K ve 1 GHz de nano-ohm mertebesinde yüzey direnci değerine sahipken (Knobloch, 1998) yüksek sıcaklık süperiletkenlerinde bu değer (77 K ve 10 GHz'de) 100 $\mu\Omega$ civarındadır (Talanov, 2000). Bu küçük kayıplar süperiletkenlerin daha önce belirtilen sınırlama sorununun üstesinden geleceğini gösterir. Kısaca, süperiletken bazlı metamalzemeler özgün meta-yapılar için çok elverişlidir. Linear olmayan davranışları negatif indeksli fotonların parametrik amplifikasyonu için kullanılabilir dahası olası kayıpların zararlı etkilerini azaltır. Süperiletken meta-atımlar manyetik alan ve sıcaklıkla, Josephson induktansının değişimine bağlı olarak rezonans frekanslarında özgün ayarlanabilir özelliktedirler. Her iki durumda da ayarlanabilir özellik süperiletkenlik parametresinden, Cooper çiftlerinin yoğunluğundan kaynaklanır. Böylece rezonans frekansı değiştirilerek rezonansın kalite faktörü de değiştirilebilir.

Zhang vd., bu konuyla ilgili araştırmasında düşük sıcaklık süperiletkeni NbN'dan yapılmış metamalzemelerin ve şekillendirilmemiş ince filmlerin alan ile indüklenen lineer olmayan davranışını ölçmüştür (Zhang vd., 2013). NbN un enerji aralık frekansı ($f_g = 2\Delta_0/h$, Δ_0 0 K deki enerji aralığı ve h: Planck sabiti) 1.18 THz'dir, enerji aralık frekansından daha düşük değerlerden daha yüksek değerlere kadar olan aralığı tarayan THz spektrumu deneysel olarak gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık süperiletkenleri geniş enerji aralıklarına sahip olduklarından genişbantlı aralık için daha uygundur ve anizotropik dielektrik özelliktedirler. Dahası daha yüksek kritik sıcaklıklarda süperiletken özellik gösterdiklerinden sıvı nitrojen sıcaklığında çalışılabilirler. Yine aynı konuda diğer bir çalışmada YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) yüksek sıcaklık ince filmlerinden lineer olmayan geçirgenlik özelliğini ölçmüştür (Zhang vd., 2013). Daha sonraki çalışmalarda, metamalzemeler malzeme kayıpları minimize edilecek şekilde dizayn edilmiş, boş uzaya daha iyi empedans uyumu gösteren yapılar tasarlanmıştır,

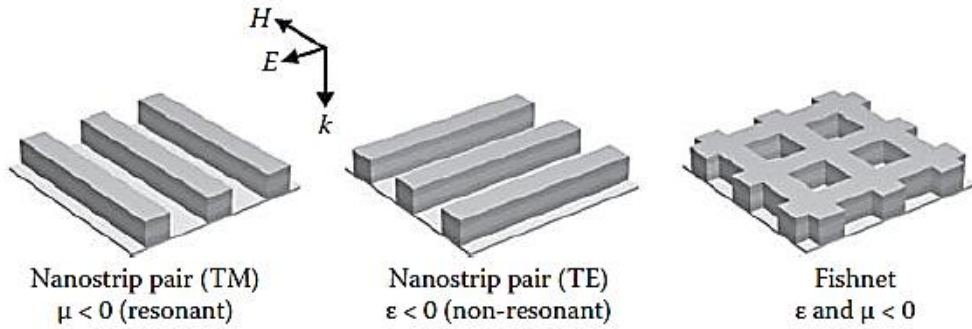
yarık-halka rezonatörleri (SRR) gibi. En son çalışmalarda da sıcaklıkla negatif geçirgenliği ayarlanabilen süperiletken yarık-halka rezonatörleri yapılmıştır (Ricci, 2006; Pendry, 2000; Claire, 2012).



Şekil 1. Farklı metamalzeme tasarımları (Claire M. Watts vd., 2012).

Şekil 1' de yarık halka rezonatörleri, elektrik yarık halka rezonatörleri gibi farklı tipte metamalzeme tasarımlarının fotoğrafları ve Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri gösterilmiştir. Pendry vd. yarık halka rezonatörleri adı verilen periyodik yapay metamalzeme yapılarla manyetik rezonans frekansına yakın frekanslarda negatif etkin μ sağlanabileceğini önermiştir (Pendry vd., 2000). SRR lar iki tane yarık halkadan oluşur. Halkalardaki yarıklar sayesinde çaptan daha büyük dalgaboylarında SRR ünitesi rezonansta tutulabilir. İç kısımdaki, yarık kısmı dış halkanın tam karşısına yerleştirilmiş halkanın amacı küçük gap bölgesinde yüksek kapasitans sağlayabilmektir. İki halka arasındaki boşluk halkalar arasından akım geçmesini engeller. Fakat iki halka arasındaki yüksek kapasitans değeri akım geçişine olanak verir. Yarık halka rezonatörlerin periyodik ortamda birleştirilmesiyle rezonatörler arasında güçlü manyetik etkileşim oluşur ve bu malzemeden özgün özellikler elde edilir, isotropi sağlanır. Maxwell eşitliklerinden bilinmektedir ki, tasarlanan yapıları daha yüksek frekans değerlerinde kullanabilmek için yapıların boyutlarını küçültmek gerekir. Örnek olarak daha önce mikrodalga aralığında kullanılan SRR yapılar daha düşük ebatlar kullanılarak terahertz frekansında kullanımı sağlanabilmiştir. Smith vd. deneysel çalışmalarında, SRR yığınları ve ince tel yapılar kullanarak solak malzemeler yapılabileceğini göstermiştir (Smith vd., 2004). Yarık halka rezonatörleri belirli frekansların üzerinde elektromanyetik dalgalara karşı yüksek manyetik karakteristik gösterir. Böylece SRR yapısının manyetik rezonansı elektromanyetik dalgaların periyodik ortam içerisinde

ilerlemesine izin vermez, stop bandı oluşur. Süperiletken split ring ve tellere ek olarak süperiletken metamalzemelerin yeni uygulama alanları Süperiletken/ferromanyetik kompozitler, DC/RF süperiletken metamalzemeler, SQUID metamalzemeler ve süperiletken fotonik kristaller olarak sınıflandırılabilir. Son metamalzeme araştırmalarında, ayarlanabilir ve lineer olmayan karakteristiklere sahip olan metamalzemeler yapabilmek için fishnet ve benzeri yapılar üzerine de çalışılmıştır. Bu malzemelerden mikrodalga frekanslarında çalışabilen aygıtlar tasarlanmıştır (Sabah, 2011; Shen, 2009). Yapılan çalışmaların en özelliklerinden biri önerilen yapıların sadece belirli frekans aralığında metamalzeme özellikleri gösterebilmesidir. Bu özellikler, sadece tasarlanan yapılar için tasarım koşullarında geçerli olmaktadır. Frekansın artırılması durumunda aynı özelliklerin elde edilmesi zorlaşmaktadır. Özellikle optik frekanslarında durum bir hayli değişmekte ve yeni modeller ve uygulamalar ön plana çıkmaktadır. Fakat, çalışılan frekanslarda gözlenen bu özelliklerin sağladığı pozitif durumların yansira kayıplar ve ayarlanabilirlik özelliklerin olmayışı, araştırmacıları bu özelliklerinde içinde olduğu bir yöne kanalize etmektedir. Özellikle tasarlanan metamalzemelerin kayıplı oluşları pratikte bir takım ciddi sorunlara yol açmaktadır. Kayıplar, özellikle metallerden ve kullanılan altabakardan metal ve iletken kayıpları olarak karşımıza çıkmaktadır. Metal kayıplarının, süperiletken kullanılarak hatırı sayılır bir oranda azaltılacağı düşünülmektedir. Böylece, sunulan proje bu noktada önem kazanmaktadır.



Şekil 2. Fishnet yapısının şematik gösterimi (Tutorials in Metamaterials, Mikhail A. Noginov)

Fishnet yapısında, daha geniş metal şerit çiftleri asimetric akımlarla negatif manyetik geçirgenliği sağlarken dar metal şeritler seyreltilmiş metal olarak davranırlar. Şekil 2' de de görüldüğü gibi, fishnet yapısı rezonant ve non-rezonant iki yapının birleşiminden oluşur. Fishnet yapılarında, dar metal şerit çiftleri off-rezonant teller olarak davranırken manyetik rezonans geniş şeritlerde oluşur, dar metal çiftleri negatif dielektrik geçirgenliğe altyapı hazırlamak için gereklidir.

Metamalzemelerde son zamanlarda trapped modlar denilen dış elektromanyetik alanla zayıf etkileşime sahip modların uyarılması gözlemlenmiştir. Bu uyarım yüzey akım dağılım simülasyonlarında kanıtlanmıştır. Bu sözkonusu modlarda radyasyon kayıpları, rezonans frekansında geliştirilmiş geçirgenliğin depoladığı alan enerjisine göre çok düşüktür. Bu modlar elektromanyetik indüklenen transparan atomic sistemlerle iletilen radyasyonda keskin bir faz dağılımı ve geniş stop band içinde dar bir iletim bandı gibi benzerlikler gösterir. Bu özellikler kompakt metamalzeme tabanlı yüksek seçicilikte band-geçirgen filtrelerinin yapımına olanak sağlar. Terahertz sistemleri için düşük ekleme kayıplı (IL), keskin kesimli ve düşük maliyetli kompakt band-geçirgen filtreler tasarlanmalıdır. Mikrodalga aralığında çalışabilen filtre dizaynı için tamamlayıcı yarık halka rezonatörleri (CSRRs) metamaterial bileşenler olarak büyük ilgi görmüşlerdir (Shen, 2009).

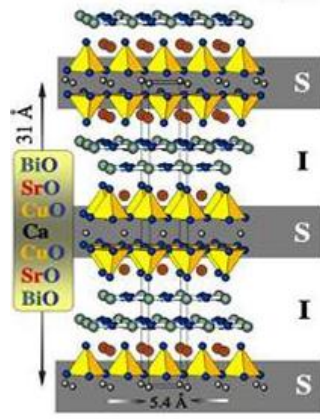
3. MOTİVASYON

Bu projedeki amacımız metamalzemelerden yeni özellikli filtreler tasarlamaktır. Metamalzeme filtre yapıları için önceki çalışmalarda genellikle metal malzemeler kullanılmıştır fakat çalışılan ohmik kayıplar ve bu malzemelerin frekans ayarlanabilirlik özelliklerin olmayışı, araştırmacıları bu özelliklerinde içinde olduğu bir yöne kanalize etmektedir. Özellikle tasarlanan metamalzemelerin kayıplı oluşları pratikte bir takım ciddi sorunlara yol açmaktadır. Metal kayıplarının, süperiletken malzemeler ile büyük oranda azaltılacağı düşünülmektedir. Kinetik indüktansı ve süperakışkan yoğunluğu sıcaklığa bağımlı olan süperiletken THz metamalzemelerin düşük ohmik kayıp ve sıcaklıkla frekansın ayarlanabilirlik özellikleri bu malzemeleri metalik özellikte metamalzemelerden üstün kılmaktadır. Sıcaklık, kritik geçiş sıcaklığına yaklaştığında (T_c) ve daha düşük sıcaklıklarda değiştirildiğinde, süperiletken filmin etkin kinetik indüktansına bağlı olarak filtrenin rezonans frekans ayarlanabilir özelliği de artmaktadır. Sunulan proje kapsamında, süperiletkenlerin bu üstün özellikleri ile terahertz bandında çalışan, verimli, kompakt, metamalzeme tabanlı yüksek seçicilikte band-geçirgen filtre tasarımını ve fabrikasyonu hedeflenmiştir. Yüksek seçicilikte tasarlanan filtreler önceden tanımlanmış frekans aralığında istenmeyen sinyallerin iletimini engelleyebilir ve THz uygulamaları için kullanılabilir. Bu özellik uygun filtre tasarımıyla birleştiğinde süperiletken metamalzemelerin geniş band THz uygulamalarına katkıda bulunacaktır. Planlanan çalışmalar, ülkemizde kendi alanlarında uluslararası düzeyde ilerleme kaydetmiş araştırma gruplarını birleştirerek bir sinerji içinde çalışma programı eşliğinde bu yapıların araştırılmasını ve geliştirilmesini amaçlamıştır.

4. Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} (Bi2212)'NİN YAPISI

Bu projede süperiletken ince film olarak BSCCO kullanılması planlanmıştır. Süperiletkenlerde, yapısal özelliklerin, yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin (YSS) süperiletkenlik özelliğine önemli bir etkisi vardır. Bütün seramik süperiletkenleri, klasik perovskit ABO₃ yapısıyla yakından ilgili benzer katmanlardan oluşurlar. Bu katmanlı YSS'lerinden biri de Bi temelli süperiletkenlerdir. Bu yapıdaki süperiletkenlerin genel formülü Bi₂Sr₂Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4+δ} şeklinde verilir ve burada n perovskit ünitesinin sayısı ya da birim hücre içerisindeki bakır oksit tabakalarının sayısını ifade eder. Bi temelli YSS'lerinin 3 farklı fazı ve kritik sıcaklık değerleri, n=1 için Bi₂Sr₂CuO_{6+δ} (Bi2201) ve T_c≤20 K (Yurgens, 2000) , n=2 için Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+δ} (Bi2212) ve T_c≈95 K, n=3 için Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+δ} (Bi2223) T_c=110 K (Ting-Wei, 1995) şeklindedir. Bu üç fazdan en çok kullanılanlardan biri de Bi2212' dir ve Bi 2212 tek kristali doğal olarak Özgün Josephson Eklemleri (intrinsic Josephson junction) diye adlandırılan süperiletken-yalıtkan-süperiletken yapısına sahiptir. Bu doğal katmanlı yapı, yapay olarak elde edilene göre çok daha iyi özellikler gösterir (Yurgens vd., 1996). Yapıları nedeniyle yüksek sıcaklık süperiletkenleri kritik alan, öz direnç vb. parametrelerde anizotropik özellik gösterirler.

Bi2212 fazı için Ginzburg-Landau parametresi olan κ, 100 den büyüktür ve bu Bi2212 fazının 2. tip güçlü süperiletken özelliği gösterdiğine işaret eder (Michishita vd., 1996). Bi2212, süperiletken CuO₂ tabakaları arasında dizilmiş yalıtkan Bi-O ve Sr-O tabakalarından oluşur. Bi2212'nin doğası Cu-O, Bi-O ve Sr-O tabakaların farklı dizilimlerine bağlıdır. Bu yapıyı açıklamak için çok katman çok katmanlı ve proksimiti (proximity) adında iki model önerilmiştir (Revschevski ve Jegoudez, 1997). Bu modellerden çok katmanlı model Şekil 3' de gösterilmiştir.



Şekil 3. Çok katmanlı modelde Bi2212 yapısı

Çok katmanlı modele göre Bi2212 yapısı, üst üste dizilmiş 3 \AA kalınlığında Cu-O çift katmanları ve bu katmanları birbirinden ayıran süperiletken olmayan ve kalınlığı 12 \AA olan Sr-O ve Bi-O katmanlarından oluşur. Diğer katmanların rolleri tam olarak açıklanamadığı için, YSS'lerinin, süperiletkenlik özelliğinin çift Cu-O tabakaları ile ilgili olduğu düşünülür. Sr-O ve Bi-O ara tabakalarıyla ilgili genel düşünce ise bunların pasif boşluklar veya yük saklayıcıları olarak davrandığıdır. Diğer bir model olan proksimiti modelinde YSS'lerinin süperiletkenliğine sadece CuO tabakalarının değil, Bi-O tabakalarının da katkısı olduğu düşünülür. Bazı deneyler Bi-O tabakalarının yalıtkan özelliği yerine yarı metal veya süperiletken gibi davranabileceğini göstermiştir. Proksimiti etkisine göre Cu-O ve Bi-O tabakaları arasında kuvvetli bir çiftlenme komşu Bi-O tabakaları arasında ise zayıf Josephson çiftlenmesi vardır.

Yapısal anizotropi ve Cu-O tabakalarının varlığı BSCCO ailesinin fiziksel özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Anizotropik Bi2212 tek kristalli ana yapısına zarar vermeden ab düzlemi boyunca ayırılabilir.

5. DENEYSEL YÖNTEMLER

5.1 Elektron Demeti Litografisi

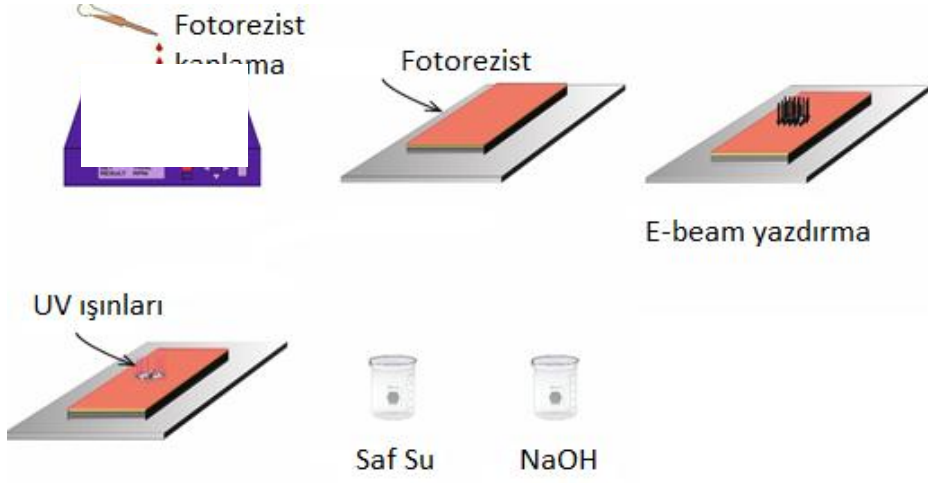
Metamalzeme filtre tasarımlarının fabrikasyonu için UV litografisi ve e-demeti litografisi teknikleri kullanılmıştır. Elektron demeti litografisi (EBL) ince bir film üzerindeki elektron demetine duyarlı polimere istenilen şekilleri oluşturmada kullanılır. Elektron demeti litografisinin en önemli avantajı ışığın difraksiyon limiti altında yani nanometre mertebesinde bile şekil oluşturabilmesidir. Yüksek enerjili elektronların kısa dalga boyları ve küçük spot

boyları bu özelliği mümkün kılar. Elektron demeti litografisi maskesiz bir uygulamadır ve fotolitografide kullanılan maskelerin oluşturulmasında da kullanılabilir. 200 nm kalınlığındaki süperiletken örneklerin üzerine tasarlanan şekil elektron demeti litografisi ile fotorezist (PR) yüzeyine transfer edildikten sonra iyon demeti aşındırma sistemine konur. İyon demeti aşındırma sisteminde, aşındırma işlemi başlamadan önce ilk olarak aşındırma çemberine turbo moleküler pompa ve mekanik pompa ile 10^{-6} Torr basınç değerine kadar pompalanır. Çünkü serbest iyon demetinin hızlanmasını arttırmak için düşük basınç değerleri gereklidir. İstenilen basınç değerine ulaşıldığında ilk olarak MKS (kütle akış kontrolcüsü) tarafından gönderilen argon gazı sisteme sürülür. Argon gazı gönderilerek örneklerimiz 67.5° lik açıyla yerleştirilerek fotorezist tabakası tarafından korunmayan alanlar aşındırılır. Yazdırılmış olan anten üzerinde fotorezist tabakası olduğundan iyon demeti ile aşındırılmaz ve böylece tasarlanmış olan periyodik filtre yapısı oluşturulur.

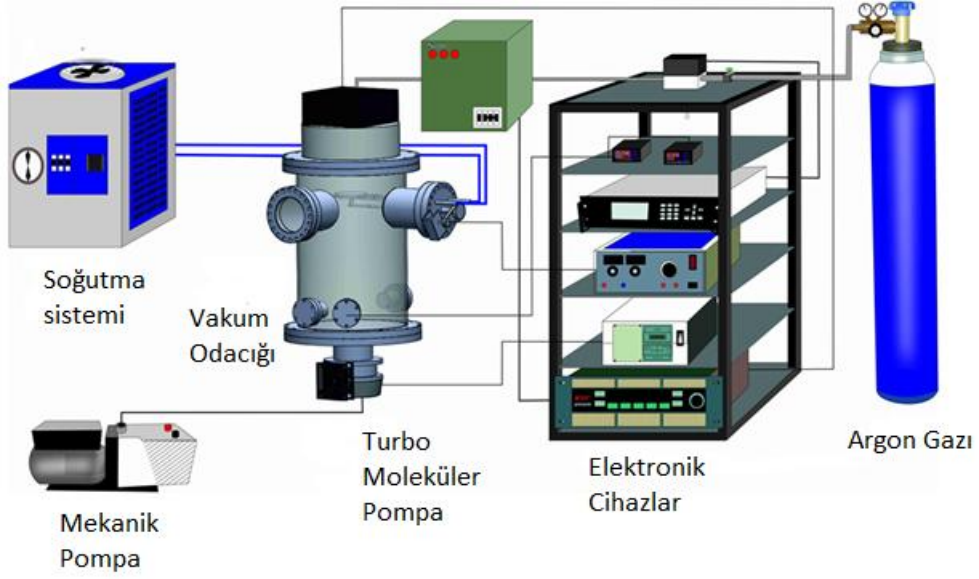
IYTE'de örnek hazırlamada ve kimyasal prosedürlerde 1000 sınıfı temiz odalarında çalışmaktayız.



Şekil 4. Elektron demeti litografisi sistemimiz



Şekil 5. Temiz oda sürecinin şematik gösterimi

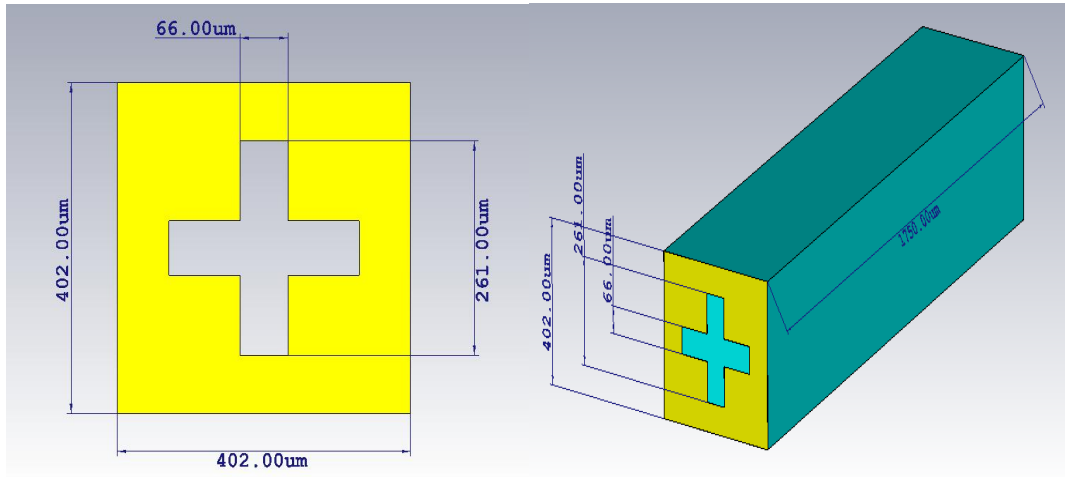


Şekil 6. İyon demeti aşındırma sisteminin şematik gösterimi

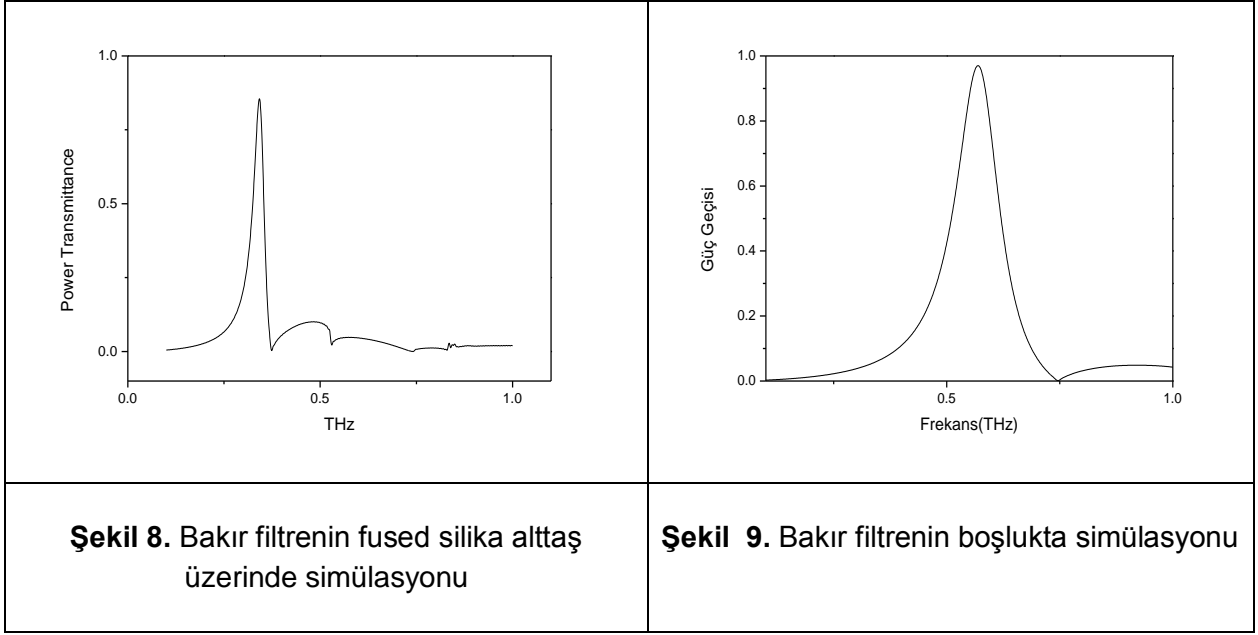
6. METAMALZEME TASARIMI VE ÖLÇÜMLERİ

6.1 Metal-Ağ Band Geçirgen Filtrelerin Tasarımı & Üretimi

Süperiletken temelli metalmalzeme filtre yapımına geçmeden önce, periyodik dizilerden oluşan Bakır (Cu), Titanyum (Ti) ve optik geçirgen İndiyum kalay oksit (ITO) metal-ağ filtreleri tasarlanmış ve fotolitografi tekniği kullanılarak THz geçiren fused silika alttaş üzerine üretilmiştir. Filtrelerin tasarımı, numerik analizi ve simülasyonları Computer Simulation Technology (CST) firması tarafından geliştirilen CST Microwave Studio (MW) programıyla yapılmıştır. Programın arayüzü kullanılarak simüle edilmek istenen yapının geometrisi oluşturulmuş ve daha sonra filtrede kullanılan materyaller birebir olarak seçilip simüle edilmiştir. Simülasyon aşaması ilk olarak bakır filtrenin boşlukta simüle edilmesiyle başlamıştır. Filtre gerçeğe uygun geometri ve materyaller kullanılarak simüle edilmiştir. Tasarımın parametreleri G/K/J sırasıyla 402/261/66 um olarak belirlenmiştir. Boşlukta yapılan simülasyon sonucunda rezonans frekansı 0.582 Terahertz'te çıkmıştır. Daha sonra bakır filtre yapısı fused silika üzerine yerleştirilip simüle edilmiştir. Bu aşamada fused silikanın dielektrik özellikleri Terahertz zamana dayalı spektroskopi cihazı yardımıyla alınan datalar yardımıyla belirlenmiştir. Elde edilen parametreler doğrultusunda dielektrik sabiti CST MW stüdyo programına eklenip tekrar simüle edilmiştir. Sonuçlar boşlukta yapılan simülasyon rezonans frekansının alttaş üzerine yerleştirildiğinde kaydığını göstermektedir. Boşlukta ve alttaş üzerinde yapılan simülasyon sonuçları aşağıda gösterilmektedir (Şekil 7,8,9).



Şekil 7. Filtre ve alttaşın boyutlarının CST simülasyon programındaki tasarımı

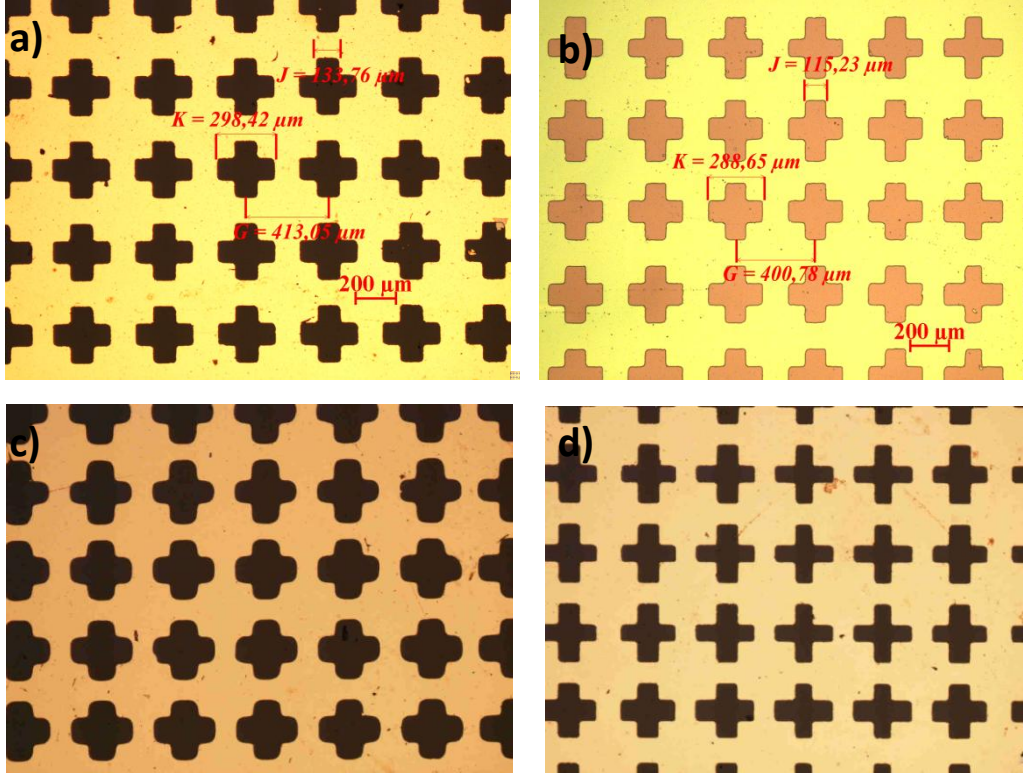


Filtre materyalinin değiştirilmesi rezonans frekansını çok etkilememektedir. Boş havada belirlenen filtre rezonansının alttaş üzerine yerleştirildiğinde kayması ise aşağıdaki formül ile açıklanabilir (Melo vd., 2012).

$$\lambda_r \rightarrow \lambda_{r_0} \sqrt{(n_1^2 + n_2^2)/2}$$

Formulden anlaşılacağı üzere dalga boyu kayması alttaşın kırıcılık indeksine ve filtrenin alttaş bulunmayan tarafının yani havanın kırıcılık indeksine bağlıdır. λ_{r_0} ise filtrenin boşlukta olan rezonans dalga boyudur.

Filtrelerin tasarımı ve numerik analizi sonrasında UV litografisi tekniği ile üretimine geçilmiştir. Öncelikle Cu, Ti ve ITO ince filmleri düşük vakum seviyesinde çalışan miknatıssal saçırma sistemi ile kaplanmıştır. Filtrelerin üretim sonrası optik mikroskop görüntüleri Şekil 10' da verilmiştir. ITO ince filmler düşük öz dirence ve optik geçirgenliğe sahip olmalarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar CST microwave studio programı ile tasarlanan filtreler Bruker Vertex V80 FTIR spektrometresi ve zamana bağlı THz spektropi sistemi ile karakterize edilmiştir. Band geçirgenlik ölçümlerinde tasarımlarla ve CST microwave simülasyonlarıyla uyumlu rezonans frekansı ve bant genişliği gözlemlenmiştir. Geçirgenlik ölçümlerinin kaplanan filmlerin iletkenliği ile bağıntısı üzerine çalışılmıştır.



Şekil 10. Ürettiğimiz Metal ağ bant geçiren filtrelerin optik mikroskop görüntüleri (Demirhan vd., 2016)

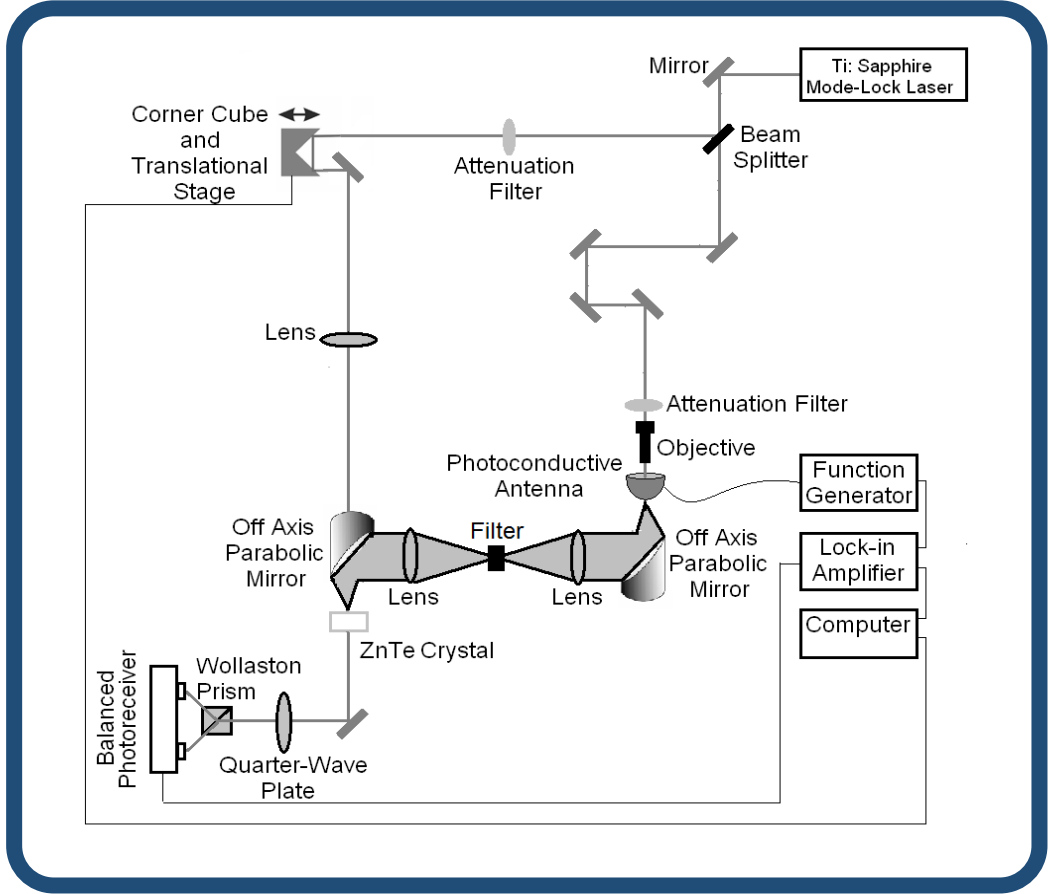
Tablo 1. Hazırladığımız örneklerin incelik ve R_s değerleri

Örnek	Malzeme	Kalınlık (nm)	R_s değeri (Ω/\square)
MF01	ITO	500	7.5
MF02	ITO	500	7.5
MF07	ITO	500	7.5
MF08	ITO	500	7.5
MF03	Ti	92	14.3
MF04	Ti	92	14.3
MF09	Cu	360-370	0.25
MF010	Cu	360-370	0.25
MF011	Cu	350-370	0.37
MF012	Cu	350-370	0.37

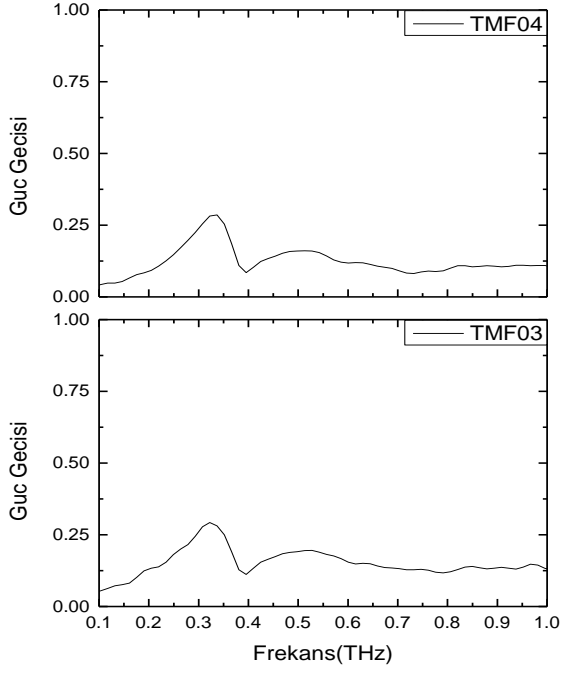
MF013	Cu	350-370	0.37
MF014	Cu	350-370	0.37

6.2 Metal-Ağ Band Geçirgen Filtrelerin Terahertz zamana dayalı spektroskopisiyle Karakterizasyonu (ODTÜ)

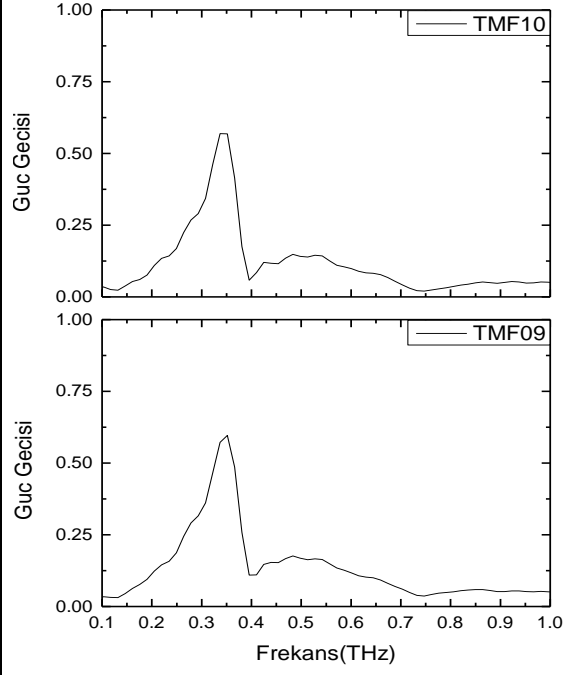
Metal malzemeler Terahertz zamana dayalı spektroskopi sistemiyle karakterize edilmiştir (Şekil 11). Bir ışık ayırıcı yardımıyla gelen ışık spektrometrenin iki optik kolunu oluşturur. Bunlar üretim ve tespit koludur. Üretim kolunda s polarize terahertz ışını multi dipole fotoelctken anten kullanılarak üretilir. antende üretilen terahertz ışını iki eksen dışı parabolik ayna ve iki TPX lens yardımıyla sisteme yönlendirilir. Bu şekilde çapı 5 mm olan bir THz ışını örneğin üzerine odaklanır. Tespit kolunda THz atımı bir fotodiyot yardımıyla elektrooptik tespit yöntemi kullanılarak tespit yöntemiyle ölçülebilir. Faza duyarlı tespit lock-in yükselteçler yapılmış ve sistemden gelen sonuçlar bilgisayar ve data toplama kartıyla elde edilmiştir. Elde edilen data 40 GHz çözünürlüktedir.



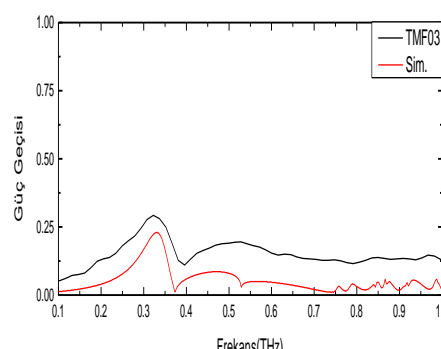
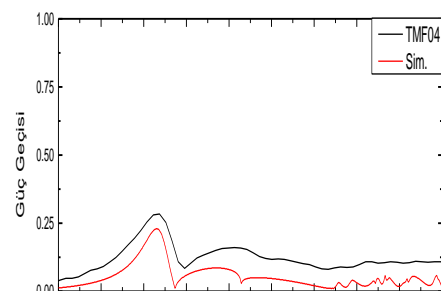
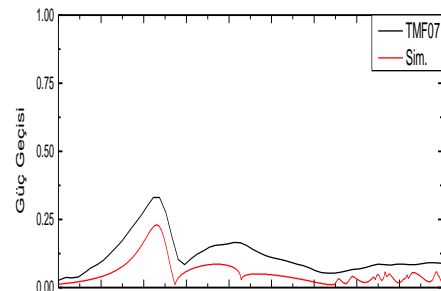
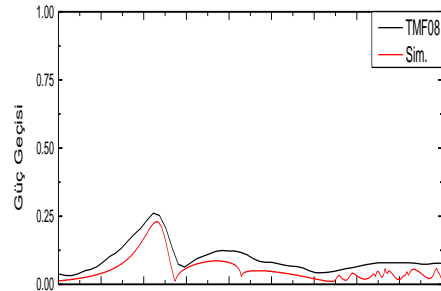
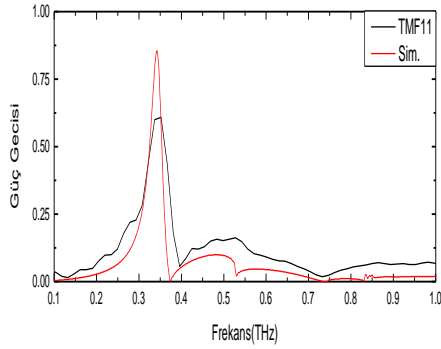
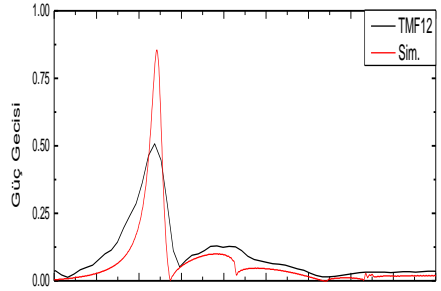
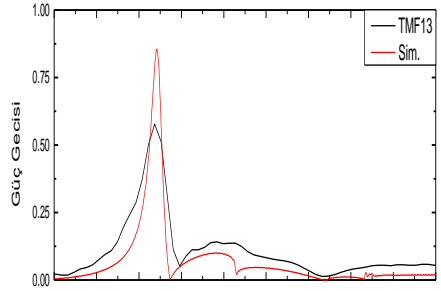
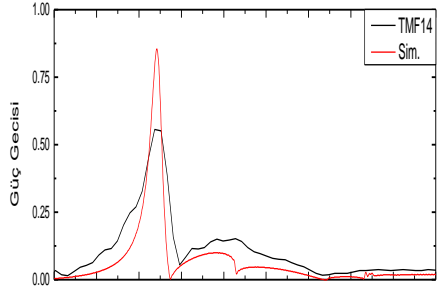
Şekil 11. ODTÜ'de bulunan TDS sisteminin şematik gösterimi.



Şekil 12. Fused Silika üzeri büyütülmüş Titanyum ince filminin THz-TDs sonuçları



Şekil 13. Fused Silika üzeri büyütülmüş Bakır ince filminin THz-TDs sonuçları



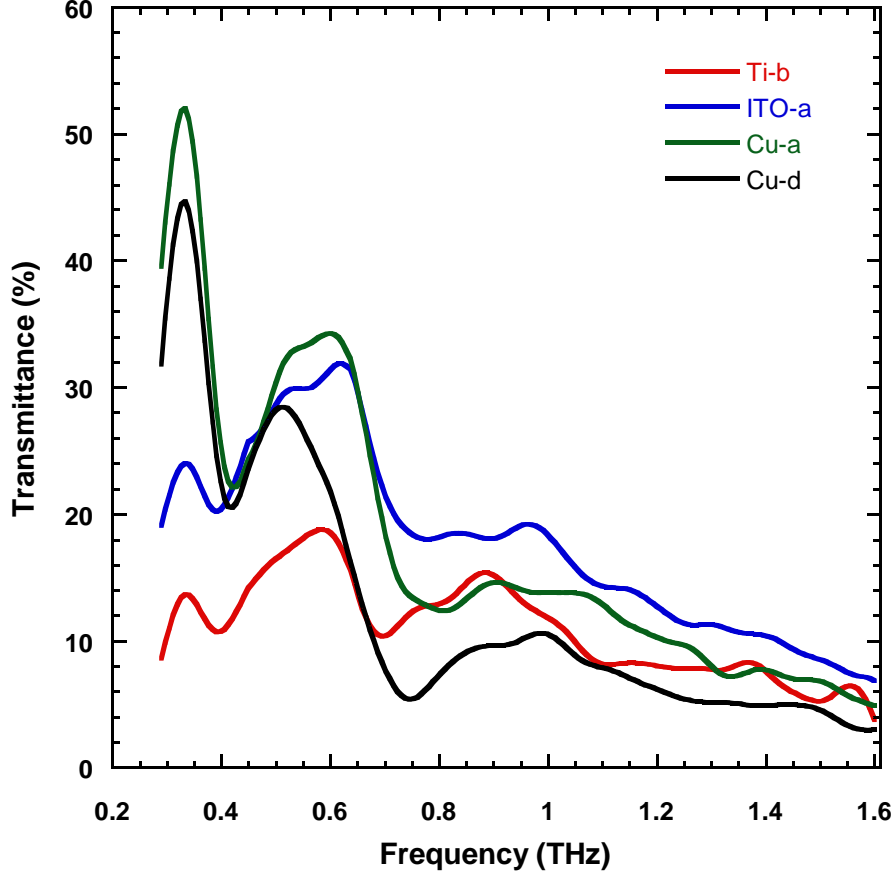
Şekil 14. Fused Silika üzeri büyütülmüş Bakır incefilminin THz-TDs sonuçları ve simülasyon sonuçları

Şekil 15. Fused Silika üzeri büyütülmüş Bakır incefilminin THz-TDs sonuçları ve simülasyon sonuçları

CLEO/Europe 2015 konferansında sunduğumuz çalışmada ise iki farklı materyalden üretilmiş fused silika üzerine üretilmiş metamalzeme filtre yapısının terahertz tayfında gösterdiği davranış incelenmiştir. Yapı CST MW stüdyo programında dizayn edilip simüle edilmiştir. İletken malzemeler bakır ve ITO olarak seçilmiştir. Malzemelerin yüzey dirençleri dört nokta yöntemi yardımıyla belirlenmiştir. Kullanılan alttaşın dielektrik özellikleri ise TDS sisteminde yapılan karakterizasyon sonucunda elde edilmiştir. Bu veriler ışığında simülasyon için gerekli sabitler elde edilmiş ve programa kullanıcı tarafından tanıtılmıştır. Simülasyonlar bize yapının hangi frekansta rezonans göstereceği hakkında önemli bilgiler sağlamıştır. Daha sonrasında yapının TDS ile ölçülmesiyle simülasyon sonuçları doğrulanmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada üretim kalitesini test etmek için aynı geometriye sahip dört aynı yapı farklı işlem süresine tabi tutulmuştur. Yapılan ölçümler ise 40 GHz çözünürlükte çizdirilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak ise simülasyon ve deneysel datada oluşan farklılıklar yüzey kalitesinin bu tip yapılar için çok önemli olduğunu gösterir. 350 GHz atmosferik geçiş penceresi olduğundan ITO kaplı yapılar kablosuz THz iletişim ve haberleşme uygulamaları için gelecek vaad etmektedir.

6.3 Metal-Ağ Band Geçirgen Filtrelerin Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ile Karakterizasyonu (İYTE)

Metal-Ağ Band Geçirgen Filtrelerin güç geçirgenlik ölçümleri Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ile de analiz edilmiştir. CST simülasyonlarıyla tahmin edilen rezonans frekansı ve band genişliği değerlerinin FTIR ölçümleriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ölçümlerde, Mylar ışın demeti ayracı ve DTGS detektörü olan Bruker Vertex 80v tipi FTIR cihazı kullanılmıştır. Ölçümler 3hPa basıncın altında gerçekleştirilmiştir, çözünürlük 2 cm^{-1} dir. Filtreler FTIR ölçümlerinde gelen ışınla 90 derecelik açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir.



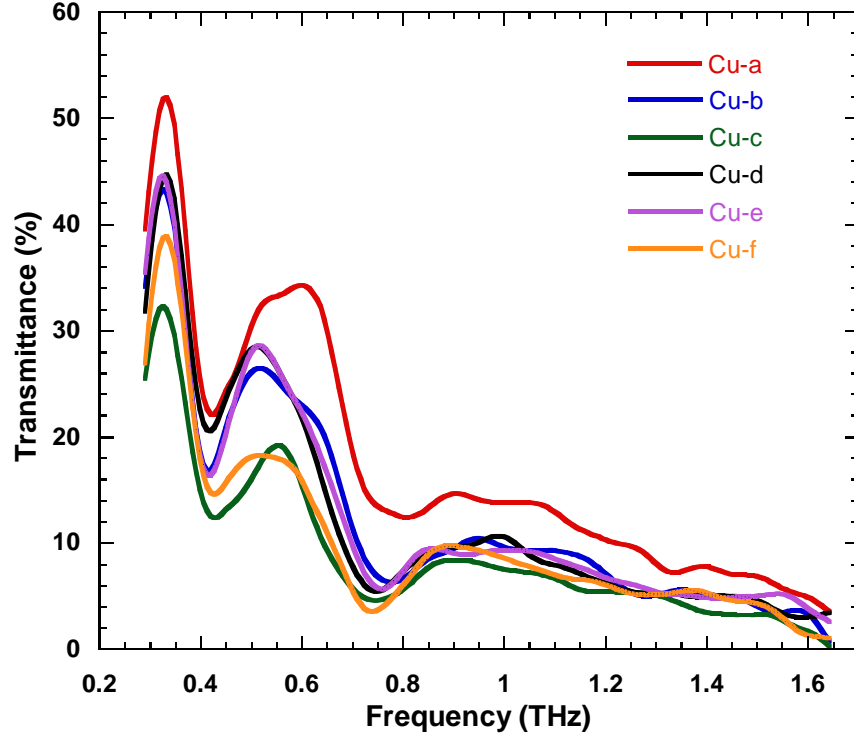
Şekil 16. Ti, ITO ve Cu filtrelerinin FTIR sonuçları (Demirhan vd., 2016)

Şekil 16’ da Ti, ITO ve Cu filmlerinden üretilen 4 farklı metal ağ band geçiren filtrenin geçirgenlik profilleri aynı grafik üzerinde verilmiştir. Aynı mesh parametreleri ile üretilen filtrelerin band geçirgenlik frekansı beklendiği gibi yaklaşık 0.33 THz’dir. Filtrelerin geçirgenliğinin artan iletkenlik ile arttığı gözlemlenmiştir. Ti filtrenin geçirgenliği sadece %15 dir ve filmin iletkenliğinin yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır.

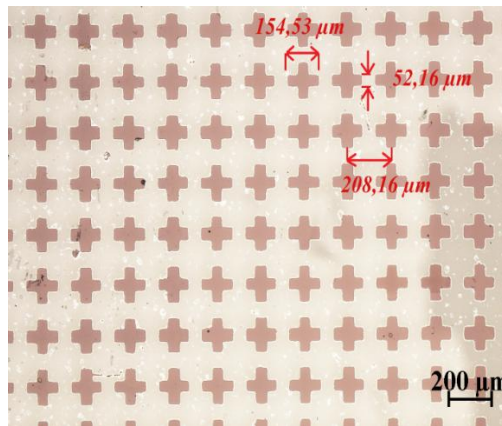
Ayrıca, metal ağ bant geçiren filtrelerin spektral özelliklerinin üretimde oluşan lokal kusurlara bağlı olduğu ve G/K/J mesh parametrelerinin herbirinin boyutlarındaki değişimin rezonans frekansında ve bant genişliğinde lineer veya lineer olmayan bir şekilde kaymaya neden olduğu gösterilmiştir. Şekil 17’de, aynı mesh parametreleri ile üretilen bakır temelli metal ağ bant geçiren filtrelerin geçirgenlik karakteristikleri aynı grafik üzerinde verilmiştir.

Bu analiz bize THz metal ağ filtrelerin oluşabilecek üretim hatalarından nasıl etkilenebileceği hakkında bilgi verir. Bütün bakır temelli filtreler aynı iletkenliğe sahip olduğu için spektral özelliklerdeki değişiklikler mesh kenarlarındaki yuvarlaklaşma, ağ yapısındaki kusur ve bozulmalarla ilişkilidir. Porterfield’in metal ağ bant geçiren filtre makalesinde, filtrelerin bant

genişliğinin frekansın %15'i olduğu belirtilmiştir, beklediğimiz gibi aynı parametrelerle tasarladığımız Ti, ITO ve Cu temelli filtrelerin hesaplanan bant genişlikleri %13-15 değerleri arasındadır. Fakat Şekil 17'de de görüldüğü gibi, THz bant geçirgen filtrelerin bant dışındaki frekansları geçirmeme özelliği biraz zayıftır. Bu özelliği geliştirmenin bir yolu tasarımının iç kısmına da dış yüzeyle ters yüzey akımı oluşturacak metal ağ yapısı eklemektir (Otter vd., 2014).



Şekil 17. Bakır temelli filtrelerin FTIR sonuçları (Demirhan vd., 2016)



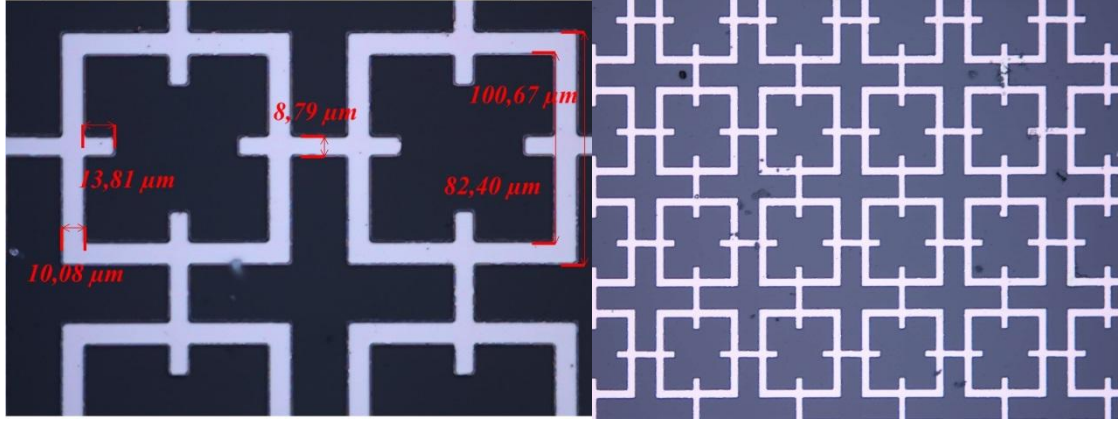
Şekil 18. YBCO incefilm üzerine ürettiğimiz metal ağ filtrenin optik mikroskop görüntüsü

Ti, ITO ve Cu üzerine oluşturulan THz metal ağ bant filtre yapıları proje kapsamında satın alınan YBCO ince filmlerinin üzerine de üretilmiştir ve bunların optik mikroskop görüntüsü Şekil 18'de verilmiştir. Örnek metamalzeme tasarımı şematik olarak Şekil 19'da gösterilmiştir.

7. METAMALZEME FİLTRE FABRİKASYONU & SİMULASYONU

7.1 İnce film kaplama & Elektron demeti litografisi ile şekillendirme

Proje araştırmacılarımızdan Cumali Sabah'ın önerdiği Şekil 19'daki kuadkross olarak isimlendirdiğimiz özgün yapının metamalzeme özellik gösterme olasılığı vardır. Bu nedenle bu özgün yapı üzerine çalışılmıştır. Bu metamalzeme filtre yapısında kullanılacak altın ve krom ince filmleri düşük vakum seviyesinde çalışan miknatıssal saçtırma sistemi ile kaplanmıştır. Kaplanan altın filmin yüzey direnci $0.37 \Omega/\text{sqr}$, kromunki ise $9.1 \Omega/\text{sqr}$ dir. Elektron demeti litografisi şekillendirilmesi öncesi istediğimiz ölçülerde filtre yapıları e-line programı kullanarak tasarlanmıştır. Daha sonra fused silika üzerine büyütülen krom ve altın filmlerin üzerine, temiz odada spinner kullanılarak 3000 rpm de 50 saniye boyunca döndürülerek yaklaşık $2 \mu\text{m}$ fotoresist (PR) tabakası kaplanmıştır. Yumuşak fırınlama diye tabir edilen teknik kullanılarak 30 dakika boyunca 90°C 'de fotorezist kaplı örnek fırınlanmıştır. Fırından çıkan örneklere tasarlanan filtre yapıları elektron demeti litografisi kullanılarak 10 kV'da yazdırılmıştır. E-demeti litografisi işleminden sonra yine temiz odada elektronların yazmadığı yerleri kaldırmak amacıyla örnekler 7 saniye boyunca UV ışığına maruz bırakılmış ve sodyum hidroksit (NaOH) solüsyonunun içinde temizlenerek çıkması sağlanmıştır. Son aşamada ise 120°C 'de 30 dakika sert fırınlama yapıldıktan sonra örnekler iyon demeti aşındırma sistemine yerleştirilmiştir, Örnek üzerinde tasarlanan filtre şeklinde fotorezist tabakası olduğundan bu kısımlar gönderilen iyon demeti ile aşındırılmamış ve böylece tasarlanmış olan filtre yapısı ince film üzerine transfer edilmiştir. İyon demeti aşındırma sisteminden çıkarılan örnek yüzeyindeki fotorezist aseton yardımıyla çıkarılıp saf su ile örnek durulanmıştır. Filtrelerin üretim sonrası optik mikroskop görüntüleri Şekil 19' da verilmiştir.

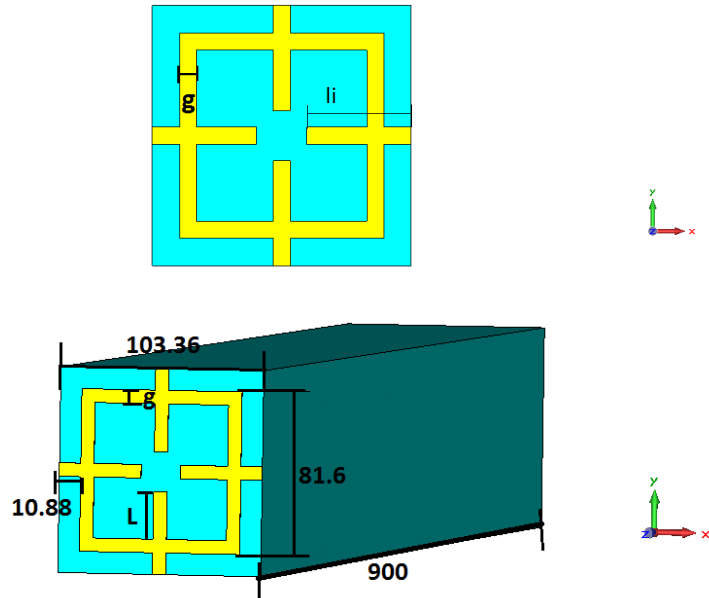


Şekil 19. Tasarladığımız ilk kuadkross metamatizeme filtrenin üretim sonrası optik mikroskop görüntüleri

7.2. Modelleme, Simülasyon & Ölçümler

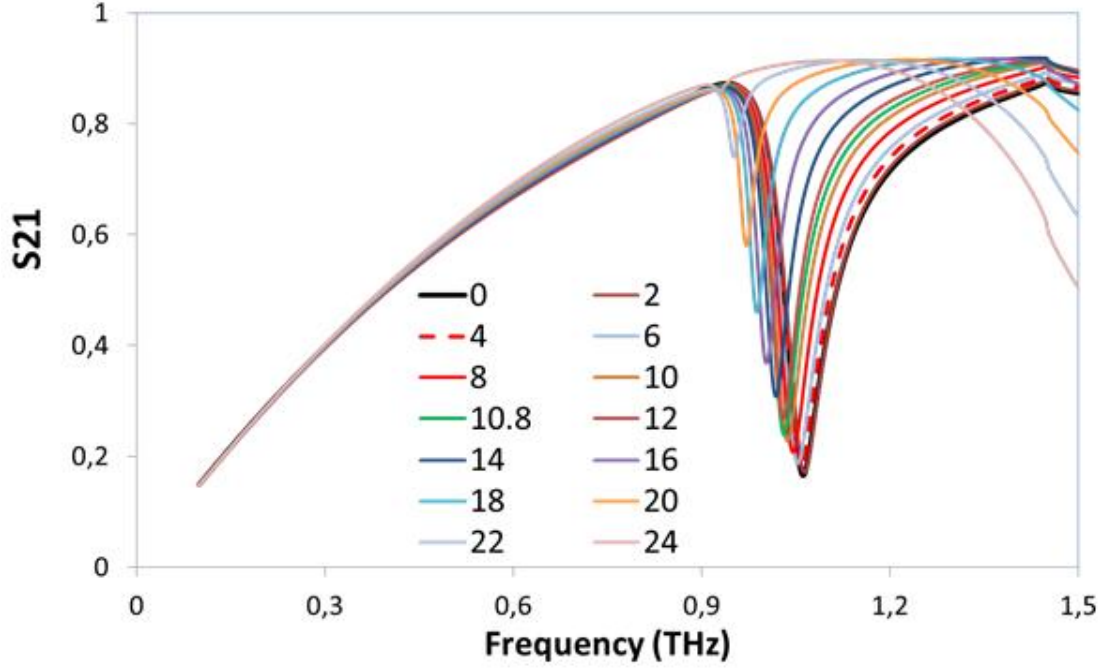
Modellemeler ve simülasyonlar Maxwell denklemlerini kullanarak elektromanyetik problemleri çözebilen CST Microwave Studio programı kullanılarak yapılmıştır.

Modelde kullanılan materyallerin bir kısmı programın kendi kütüphanesinden alınmış alıtış bilgisi ise daha önce yapılan Terahertz Zamana bağlı Spektroskopisiyle (THz-TDS) yapılan ölçümler sonucunda elde edilip programa tanıtılmıştır. Yapının numerik olarak karakterize edilmesi frekans domain kullanılarak yapılmıştır. Yapının birim hücre modelinin analizi, “birim hücre” sınır koşulları kullanılmıştır. Yapılan analizlerde geçirgenlik değeri ölçümleri alınmıştır.

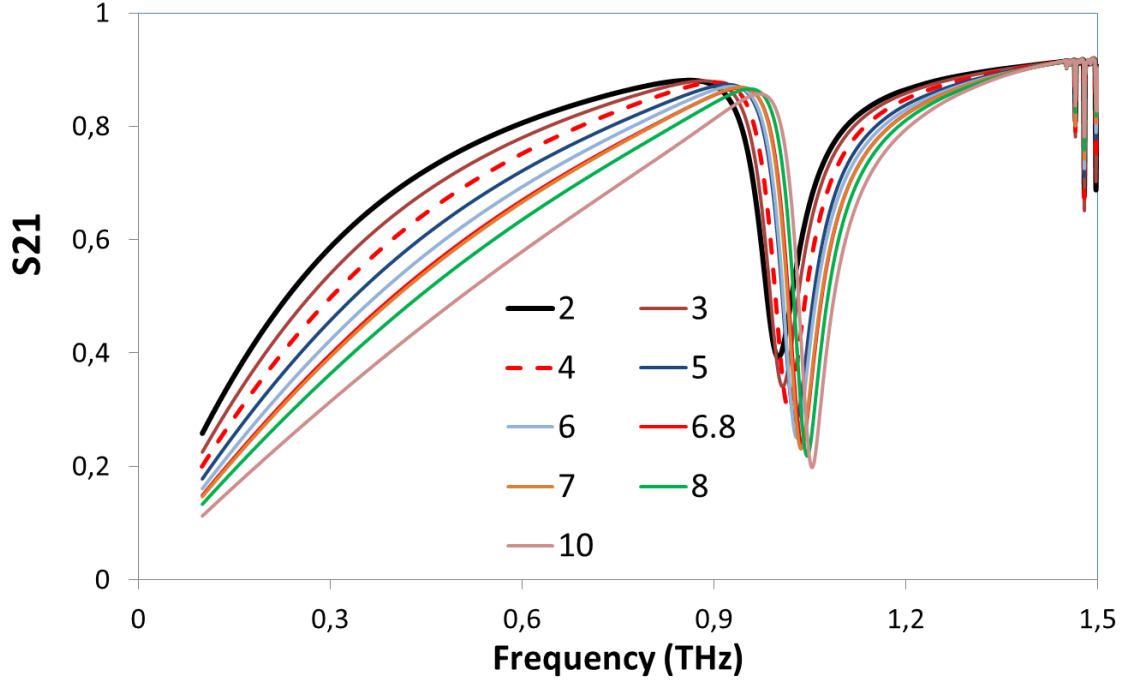


Şekil 20. Tasarlanan ilk metamatizeme filtrenin şematik görüntüleri

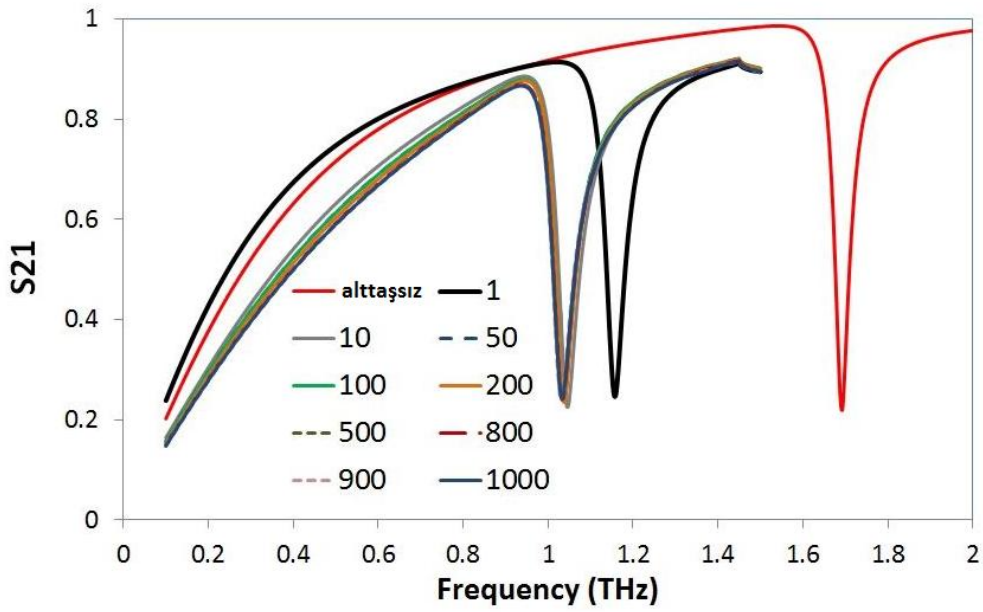
Detaylı analiz için, modelin iç kulak uzunluğunun frekansa bağlı değişimi incelenmiş ve elde edilen sonuçlara göre iç kulak uzunluğunun değişimiyle rezonans frekansında kırmızıya kayma eğilimi görülmüştür. Buna ek olarak, iç kulak uzunluğunu artmasıyla geçirgenlik değerinin de arttığı tespit edilmiştir. İlâveten, yapının metal kısımlarının genişliğinin (g parametresi) değişimiyle yapının vereceği tepki analiz edilmiştir. Numerik analiz sonuçlarına göre g parametresi artmasıyla rezonanstaki maviye kayma eğilimi olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 21. Tasarlanan kuadkross filtrenin simülasyon sonucu: l'i ye bağlı rezonanstaki değişim

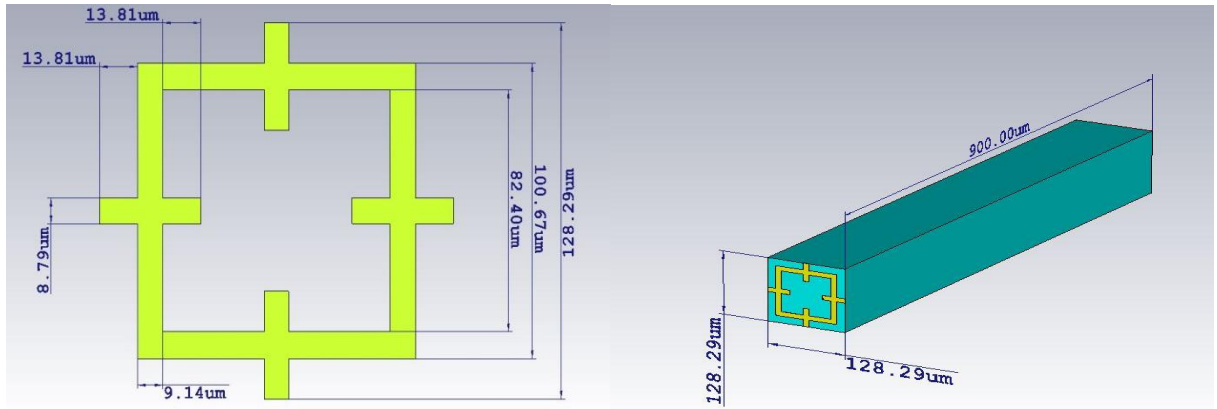


Şekil 22. Tasarlanan kuadkross filtrenin simülasyon sonucu: gi ye bağlı rezonanstaki değişim

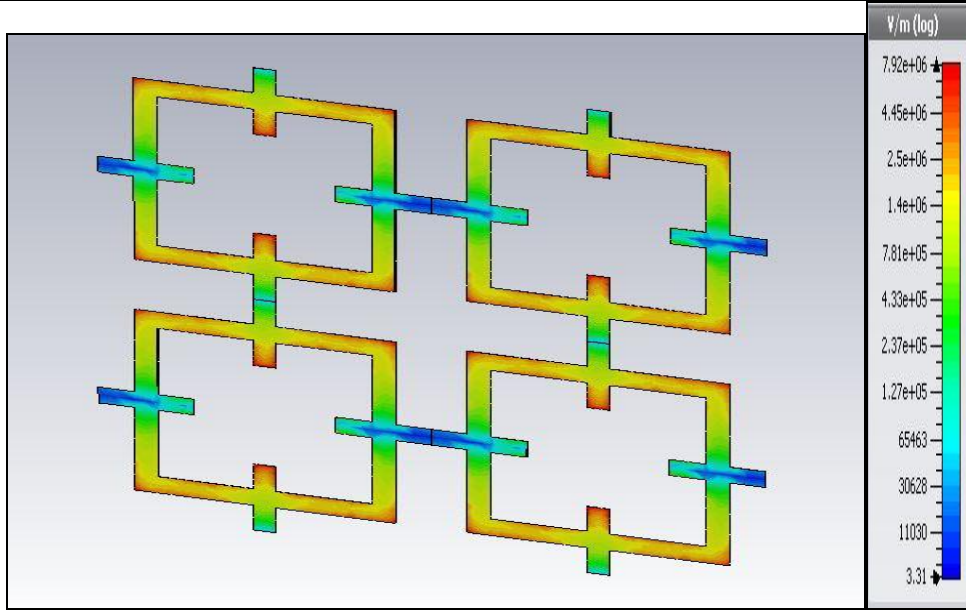
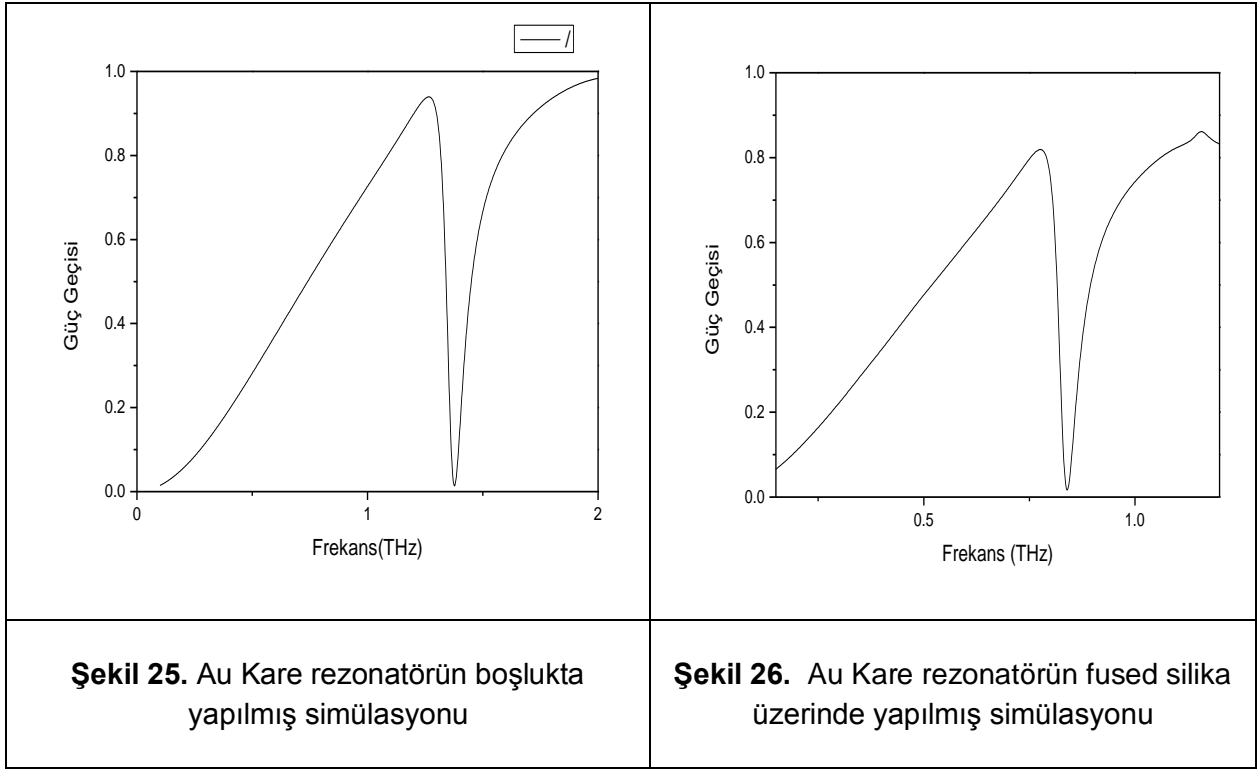


Şekil 23. Tasarlanan kuadkross filtrenin simülasyon sonucu: Altaş kalınlığına bağlı rezonanstaki değişim

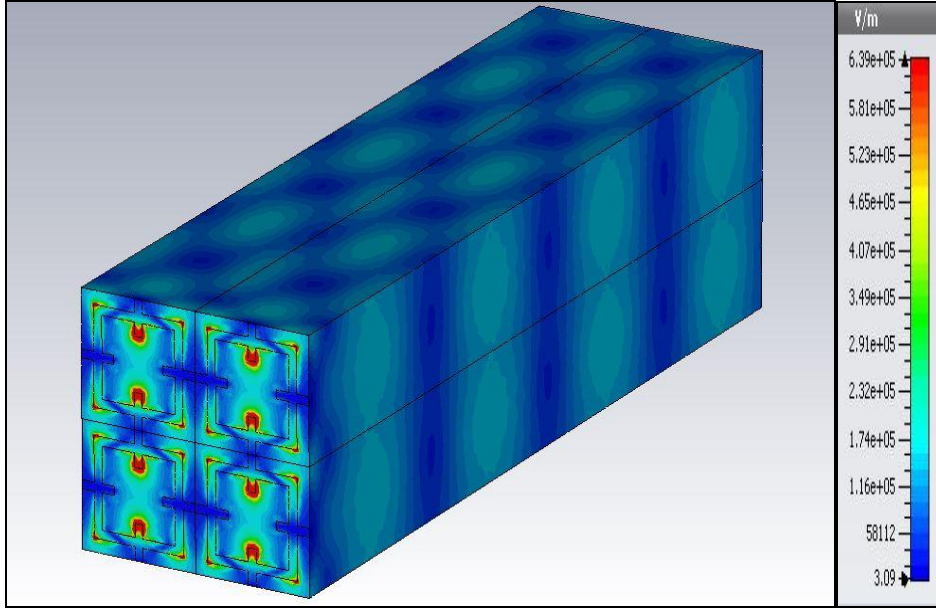
Daha sonra filtre Şekil 24’de gösterilen boyutlarda boşlukta simüle edilmiştir. Bunu amacı simüle edilen yapıda gözlemlenen rezonansın nedeninin alttaştan kaynaklanan Fabry Perot etkisi olarak adlandırılan etki olmadığına emin olmaktır. Boşlukta simüle edilen altın filtrenin 1.38 THz’de rezonans Şekil 25’de göstermektedir. Filtrenin fused silika alttaş üzerine yerleştirilmesiyle elde edilen sonuçlarda rezonansın 0.83 THz’ye kaydığı Şekil 26’da olan simülasyon sonuçlarında gözlemlenmiştir. Ayrıca filtrenin TE(0,0) modu altında rezonans frekansında elektrik alan dağılımı ve şiddeti Şekil 27’de gösterilmiştir. Ayrıca gözlemlenen rezonansın kaynağının alttaş değil şekil verilmiş iletken tabaka olduğu elektrik alan dağılımlarına bakılarak anlaşılabilir (Şekil 28). Şekil 19’de gösterilen filtrenin Terahertz Zamana Dayalı Spektroskopisiyle yapılan ölçümler Şekil 29 ve 30’da gösterilmiştir. TDS ölçümü yapılan örnekler 5 x 5 mm² alan üzerine şekillendirilmiş olup bu filmlerde kaplanan altın filmin yüzey direnci 0.37 Ω /sqr’dır. Terahertz ışınması nenden etkilenmektedir bunu engellemek için ölçüm esnasında ortamda olan nemi azaltmak için içeriye azot gazı pompalanmıştır. Ölçümler ilk olarak boş iris ile yapılmış daha sonra boş irisin üzerine alttaş yerleştirip tekrar ölçüm yapılmıştır. Daha sonra alttaş üzerinde şekillendirilmiş yüzeyler uygun kutuplaşmaya göre boş irisin üzerine yerleştirilip ölçülmüştür. Şekil 19’da gösterilen filtre yapısının altın yerine yüzey direnci 9.1 Ω /sqr olan krom kullanılarak üretilen örneklerin THz TDS ölçümleri ve simülasyon sonucu Şekil 31, 32, 33, 34’de belirtilmiştir. Bu yapıda rezonans gözlenmemiştir. Görüldüğü gibi yüzey direncinin yüksek olması rezonansın oluşmasını engellemektedir. Bu da beklediğimiz bir sonuçtur (Demirhan vd., 2016 ; Melo vd., 2008).



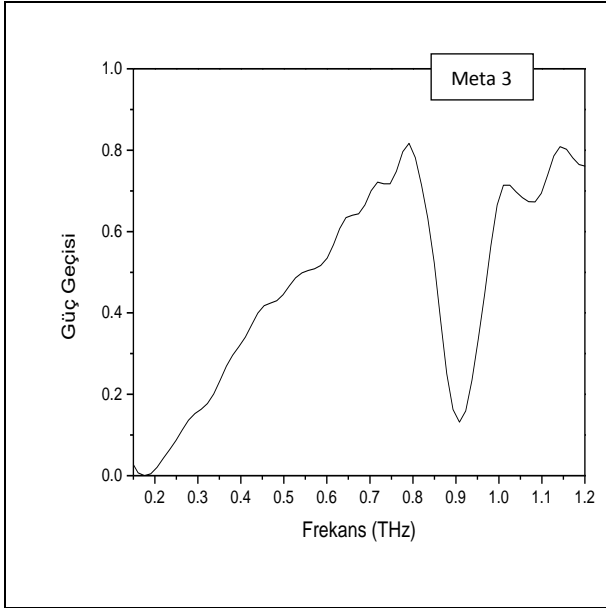
Şekil 24. Filtre ve alttaşın boyutları yukarıda belirtilmiştir.



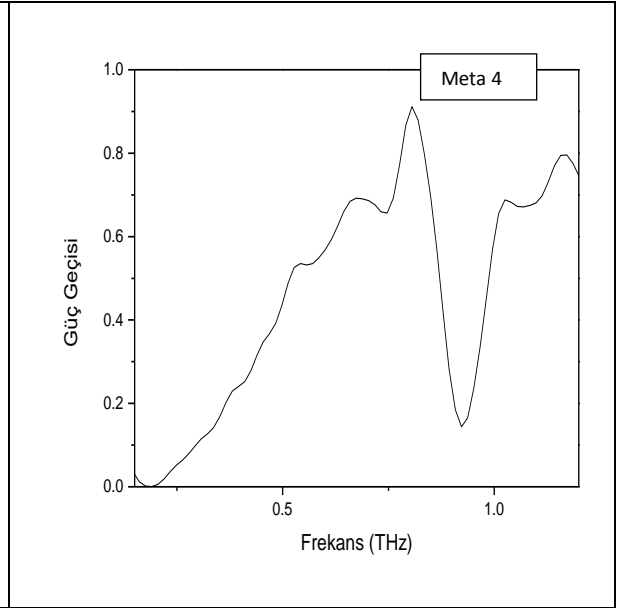
Şekil 27. Kare rezonatörün TE (0,0) mode altında boşlukta elektrik alan dağılımı.



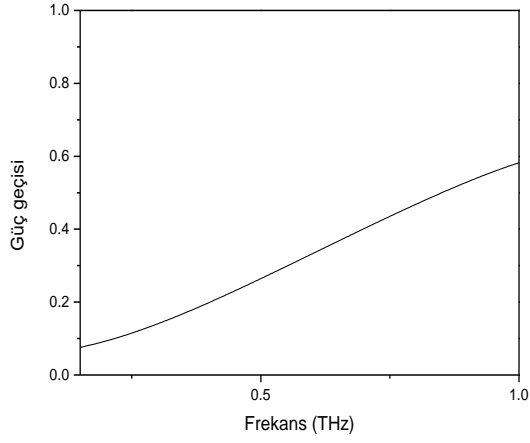
Şekil 28. Kare rezonatörün TE(0,0) modu altında fused silika alttaş üzerinde elektrik alan dağılımı.



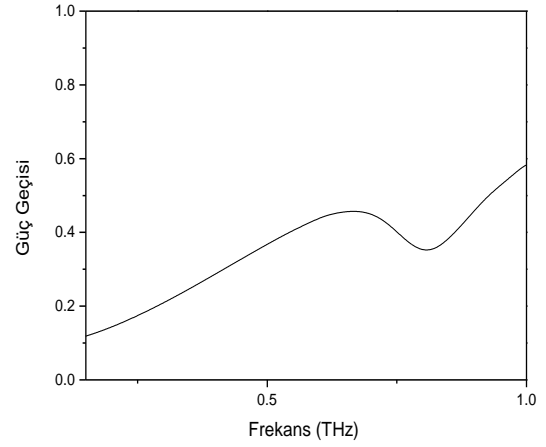
Şekil 29. Au kare rezonatörün TDS ölçümü



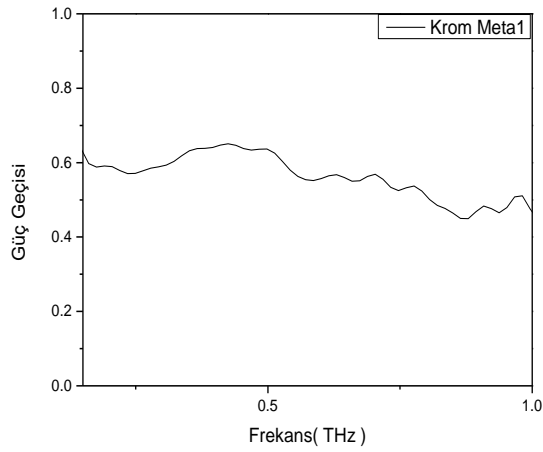
Şekil 30. Au kare rezonatörün TDS ölçümü



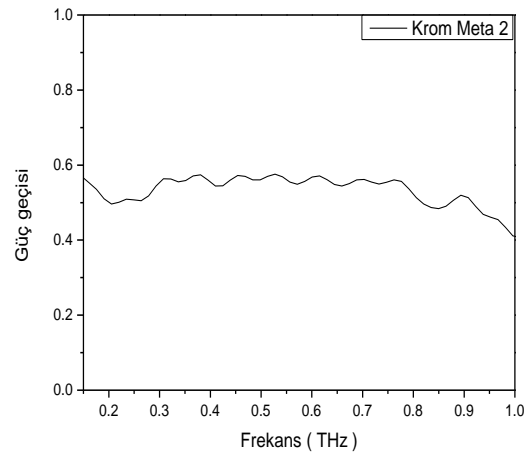
Şekil 31. Krom kare rezonatörün boşlukta simülasyonu



Şekil 32. Krom kare rezonatörün alttaş üzerinde yapılmış simülasyonu



Şekil 33. Krom kare rezonatörün TDS ölçümü



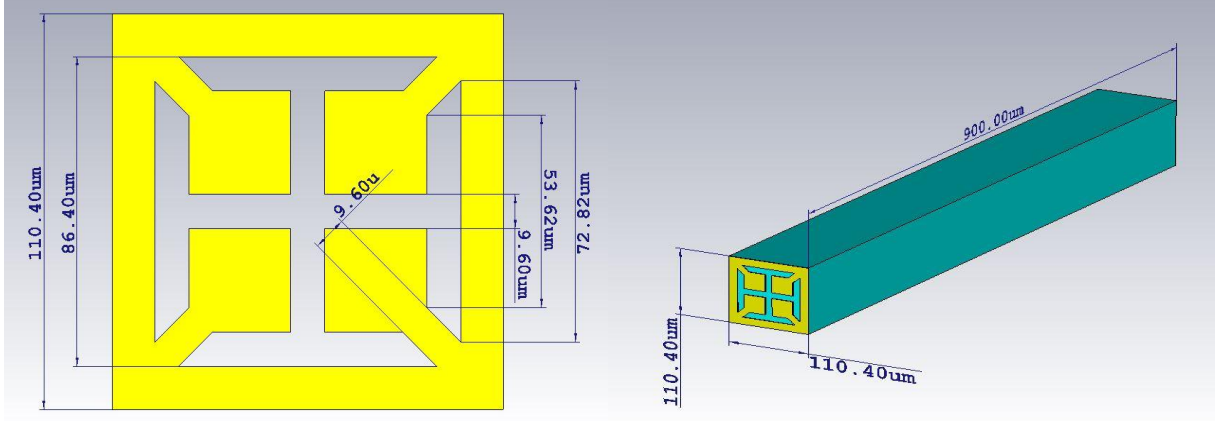
Şekil 34. Krom kare rezonatörün TDS ölçümü

7.3. Alternatif Yapılar

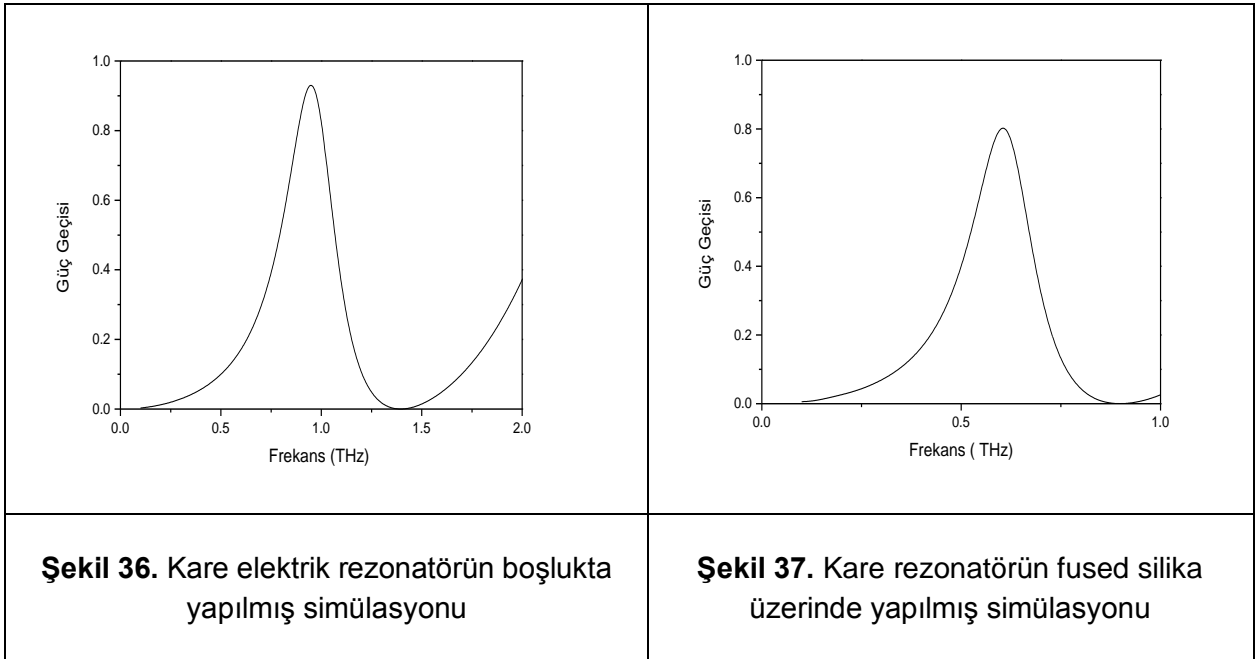
Fused silika alttaş üzerine tasarlanmış başka bir yapı olan tümleyici (complementary) elektrik ring resonator yapısının modellenmesi ve simülasyonları yapılmıştır. Yapının boyutları Şekil 35'de gösterilmiştir. Rezonatorun boşlukta yapılan simülasyonunda rezonans 0.93 THz'de

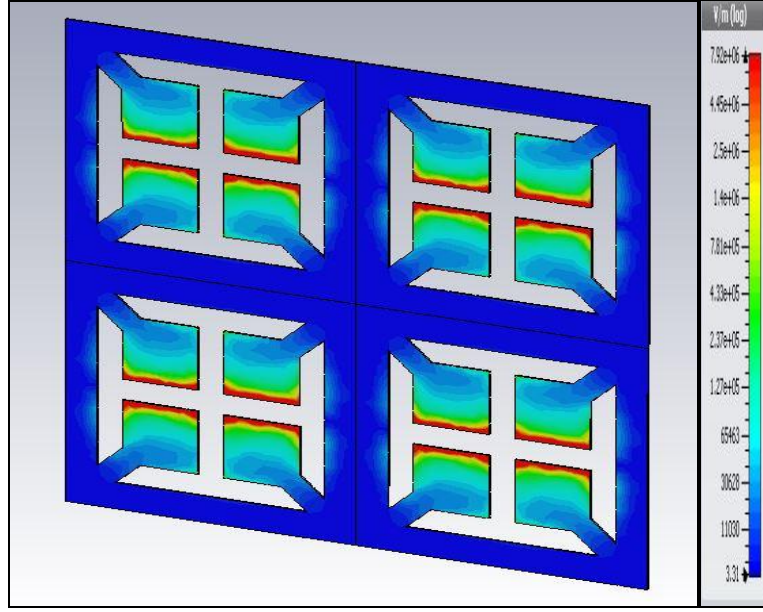
gözlemlenmiştir (Şekil 36). Fused silika alttaş üzerinde simule edildiğinde ise rezonansın 0.6 THz'e kaydığı gözlemlenmiştir (Şekil 37).

Yapılan simülasyonlar sonucunda TE(0,0) modu altında elde edilen rezonansın büyük bölümünün şekillendirilmiş iletken kısımdan geldiği rezonans frekansında elektrik alan dağılımında görülmektedir (Şekil 38-39).

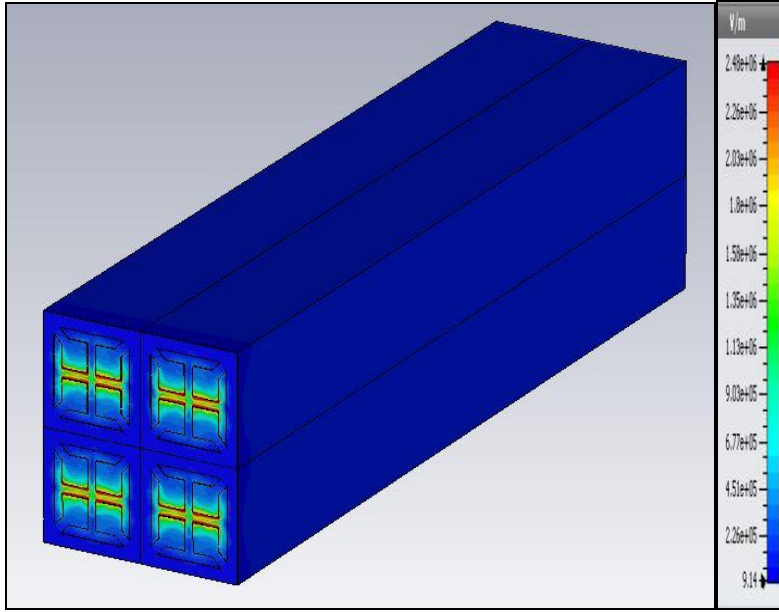


Şekil 35. Kare elektrik ring resonatör ve alttaşın boyutları.

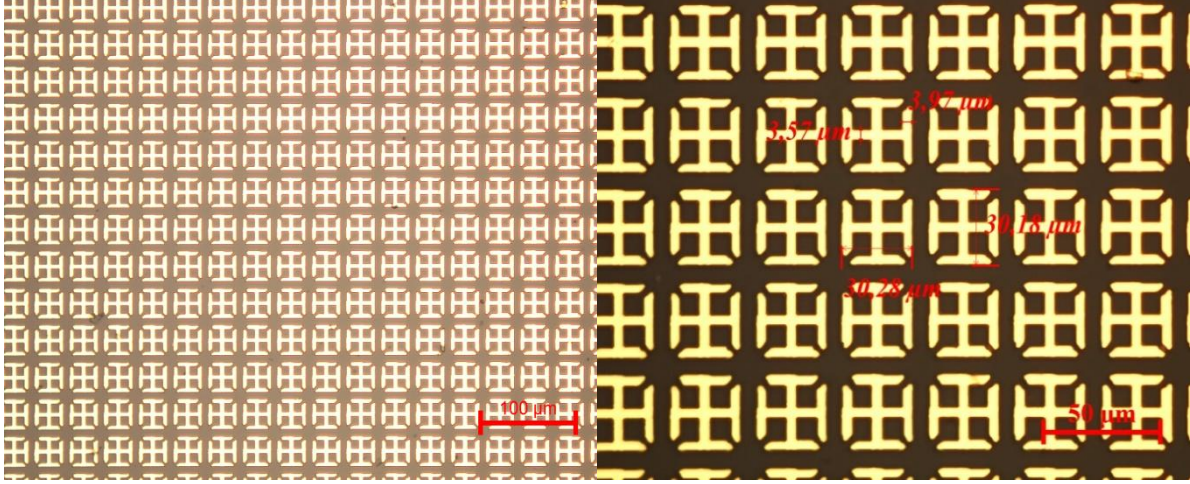




Şekil 38. Kare elektrik rezonatörün TE (0,0) mode altında boşlukta elektrik alan dağılımı.



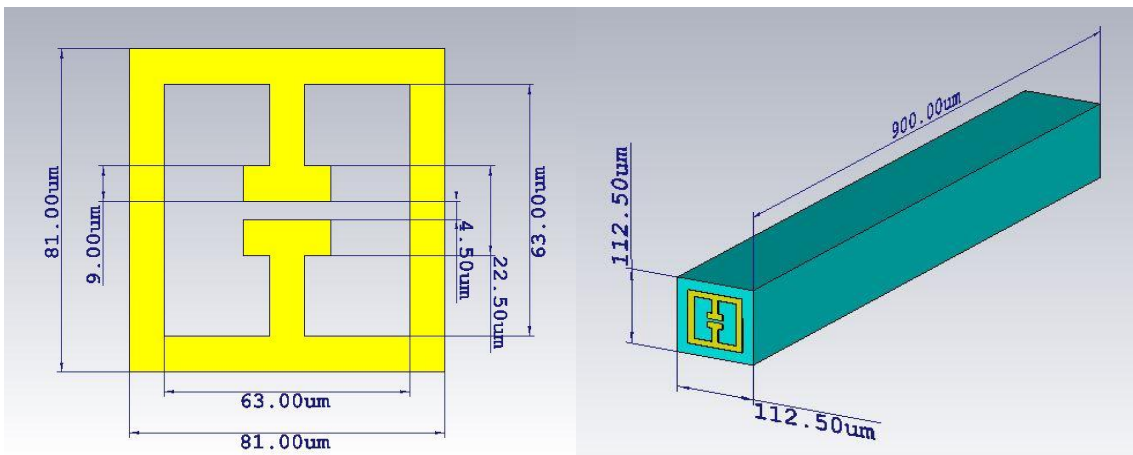
Şekil 39. Kare elektrik rezonatörün TE(0,0) modu altında fused silika alttaş üzerinde elektrik alan dağılımı.



Şekil 40. Tasarlanan ikinci model metamalzeme filtrenin üretim sonrası optik mikroskop görüntüleri

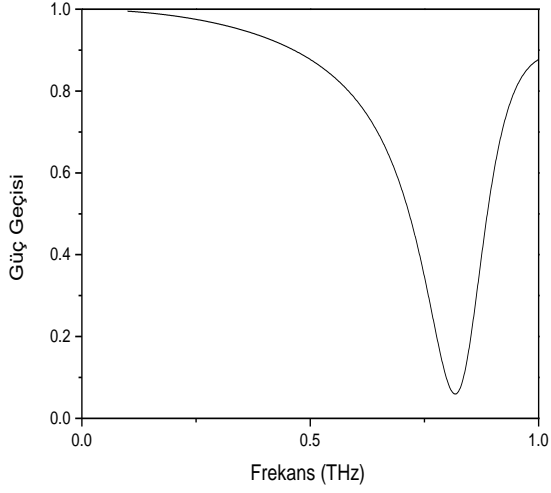
Yukarıda bahsettiğimiz (Singh vd., 2013) bu filtrenin Au film ile üretimi yapılmıştır (Şekil 40). Terahertz geçirgenlik karakterizasyonu sonuçları yeterli derecede bilgi vermemiştir. Bunun sebebinin ise üretilen yapıdaki düzensizlikler olarak düşünülmüştür. Şekil 40'da görüldüğü üzere yapılar homojen olarak üretilmemiştir. E-demeti litografisi ile üretilen örneğin yazma süresi çok yüksek (60 saat-tek örnek) olduğu için tekrar hazırlanmamıştır.

Tasarlanıp simülasyonu yapılan başka bir filtre ise kapasitif elektrik split ring resonatördür. Yapının geometrisi aşağıda gösterilmiştir (Şekil 41). Yapı öncelikle boşlukta simüle edilmiş ve rezonansın kaynağının fabry perot etkisi olmadığı iletken tabakadan kaynaklandığına emin olunmuştur. Boşlukta yapılan simülasyon sonucunda rezonans 0.8 THz'de olduğu belirlenmiş altlık ile yapılan simülasyonlarda ise rezonans 0.51 THz'ye kaymıştır (Şekil 42-43).

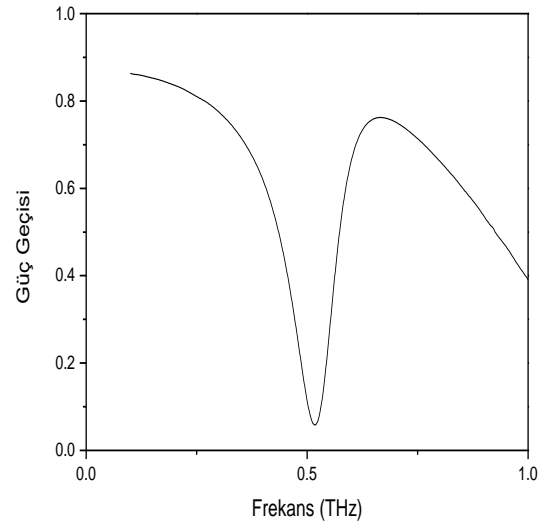


Şekil 41. Kare elektrik ring resonatör ve alttaşın boyutları.

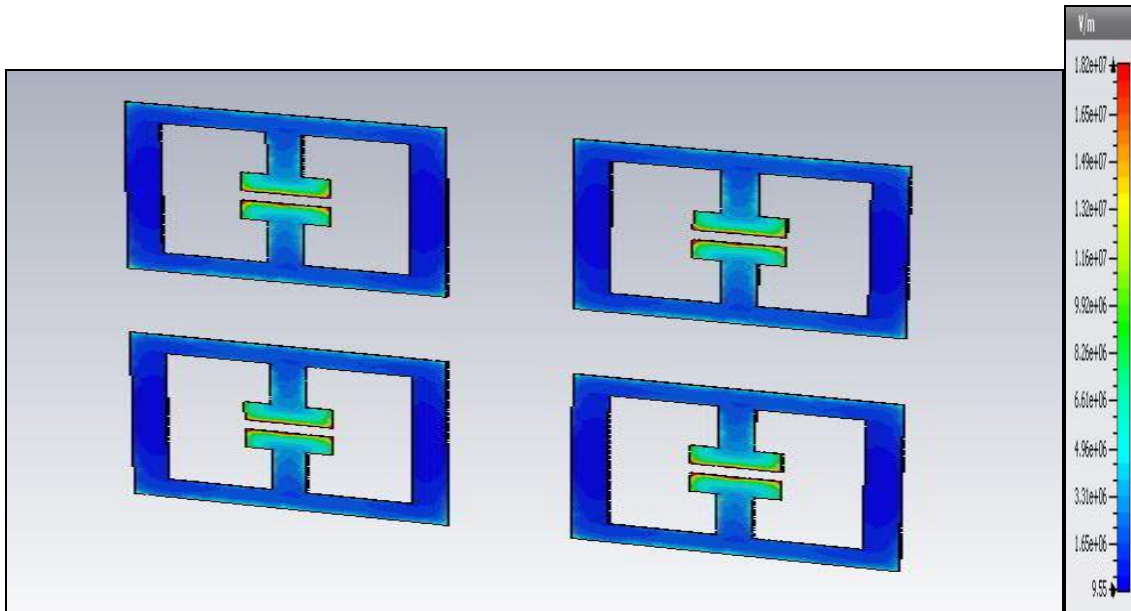
Daha sonra tasarımı yapılan metamalzemedeki TE(0,0) moda göre geometrik yapının sonucu olarak elektrik alan dağılımının nasıl olduğu belirlenmiştir. Filtre daha sonra alttaş üzerinde simüle edilip rezonansın kaynağının iletken tabaka olduğu kesinleştirilmiştir (Şekil 44-45).



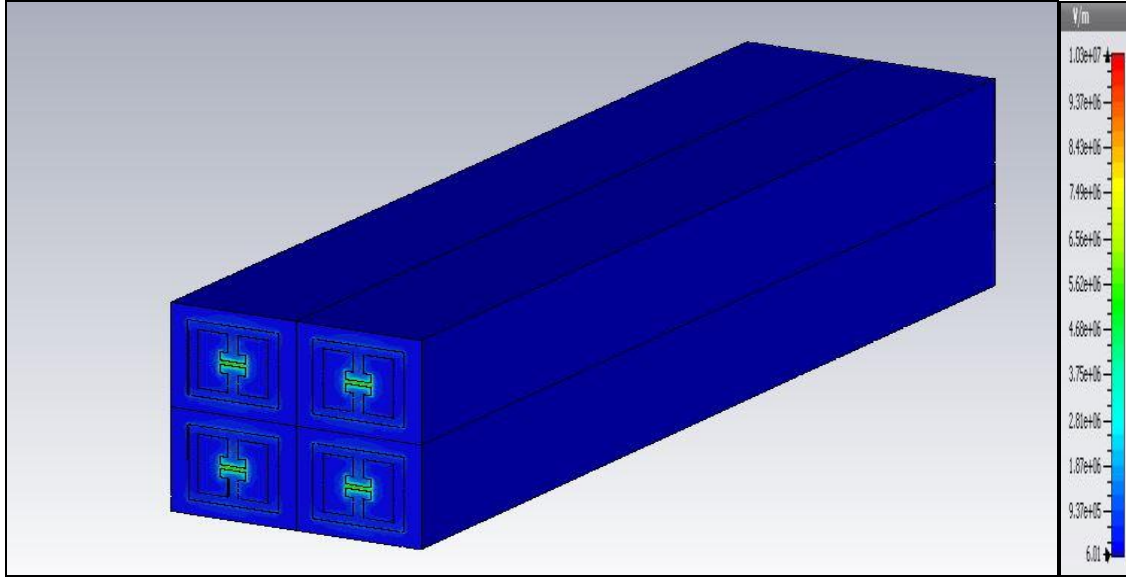
Şekil 42. Kare elektrik rezonatörün boşlukta yapılmış simülasyonu



Şekil 43. Kare rezonatörün fused silika üzerinde yapılmış simülasyonu



Şekil 44. Kare elektrik rezonatörün TE (0,0) moda göre boşlukta elektrik alan dağılımı.



Şekil 45. Kare elektrik rezonatörün TE(0,0) modu altında fused silika alt taş üzerinde elektrik alan dağılımı.

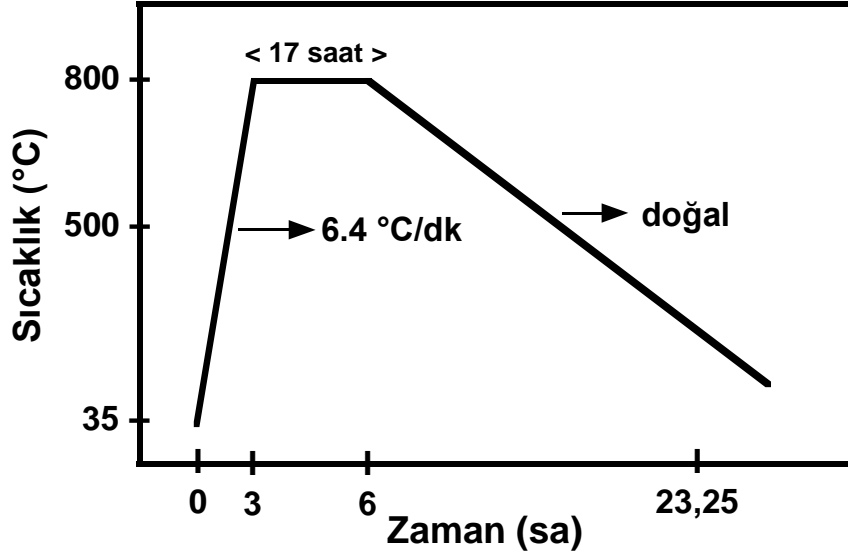
8. Bi2212 İNCE FİLM KAPLAMA ÇALIŞMALARI

8.1 Bi2212 Hedef Hazırlama İşlemleri

Projenin hedeflerinden olan süperiletken metalmazeme THz filtreleri yapmak amaçlı $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ (Bi2212) hedef yapmak için başlangıç tozları olarak Bi_2O_3 , SrCO_3 , CaCO_3 ve CuO kullanılmıştır. Bu başlangıç tozları mol oranlarına göre (Bi:Sr:Ca:Cu=2:2:1:2) Bi_2O_3 için 4.66, SrCO_3 için 2.95, CaCO_3 için 1.00 ve CuO için 1.59 g tartılıp havanda bütün tozlar birbirine karışıp homojen bir toz elde edene kadar dövülmüştür. Elde edilen toz Şekil 46'da görüldüğü gibi alümina kayık potanın içine yerleştirilip kalsinasyon işlemi için küp fırına yerleştirilmiştir. Kalsinasyon işleminin amacı, SrCO_3 ve CaCO_3 deki karbon maddelerinin CO_2 olarak yok etmektir. Şekil 47'de kalsinasyon ısıl işleminin sıcaklık-zaman çizelgesi görülmektedir. Elde edilen toz oda sıcaklığından 800°C 'ye $6.4^\circ\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızıyla ısıtılıp, 800°C 'de 17 saat bekletilip ve daha sonrasında doğal olarak kendiliğinden soğutulmasıyla kalsinasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem 2 kez tekrarlanmıştır.



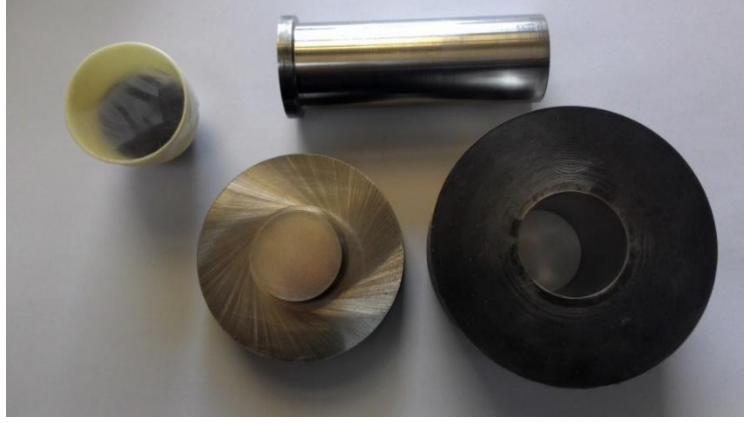
Şekil 46. Elde edilen homojen toz ve alümina kayık pota



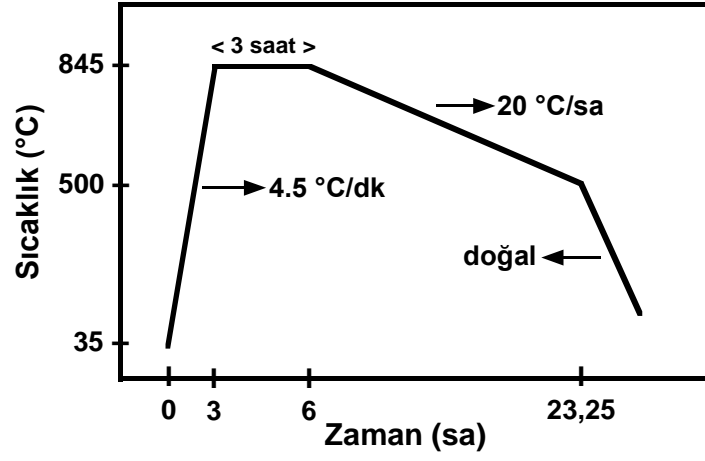
Şekil 47. Kalsinasyon ısıl işleminin sıcaklık zaman çizelgesi

Kalsine edilmiş toz Şekil 48'de görülen kalıp içerisinde dökülüp 80 MPa basınç uygulanarak 3 cm çapında 6.7 mm eninde tablet elde edilmiştir. Daha sonra bu tablet alümina levha üzerinde fırına konularak, tabletin sertleşmesi için Şekil 49'daki ısıl işlem çizelgesi uygulanmıştır. Tablet önce 4.5 °C/dk ısıtma hızıyla ısıtılıp, 845 °C'de 3 saat bekletilip ve daha sonrasında önce 20 °C/dk soğutma hızı ile daha sonrada doğal olarak kendiliğinden soğutulmuştur. Elde edilen Bi2212 hedefin fotoğrafı Şekil 50'de görülmektedir. Üretilen hedeflerden bir tanesi proje önerisinde belirtildiği gibi Erzurum Atatürk Üniversitesi Fizik bölümüne atmalı lazer kaplama yöntemi ile kaplanması için gönderilmiştir.

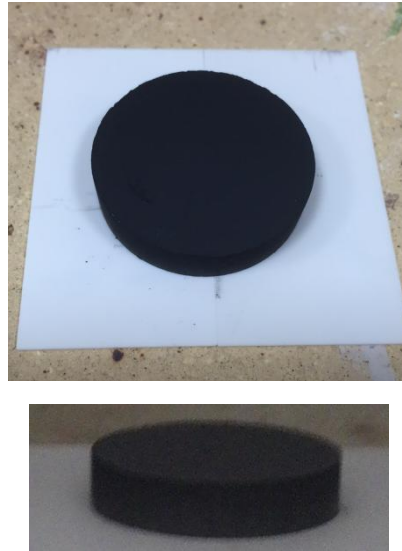
Kendi üniversitemizdeki mıknatıssal saçtırma sisteminde kaplama yapmak amacıyla yukarıda anlatıldığı gibi 4 adet 4 mm kalınlığında 3 cm çapında tablet hazırlanmıştır. Bu hazırlanan tabletler uygun bir şekilde parçalara kesilip birleştirilerek 2 inç (5.08) çapında 4 mm kalınlığında hedef elde edilmiştir (Şekil 51). 2 inç'lik hedefin 3 cm'lik hedefin üretim safhasından tek fark Bizmut(Bi)'un mol oranı 2 yerine 2.5 olarak (4.66 g yerine 5.825 g) alınmıştır. Isıl işlemler sırasında diğer malzemelere göre Bi oranı azalmaktadır ve Bi2212 fazının Bi oranı 2'nin altına düşmektedir. Bunu engellemek için Bizmut'un mol oranı 2.5 olarak alınmıştır.



Şekil 48. Alimuna kap içerisinde kalsin edilmiş toz ve tablet basma kalıbı

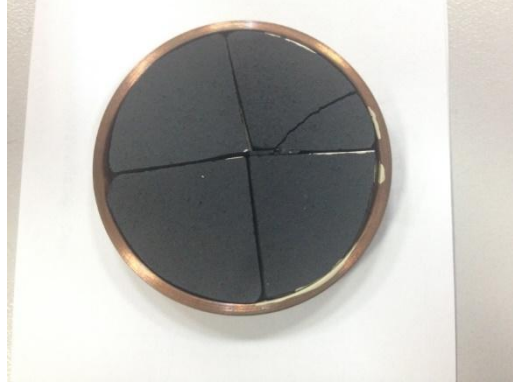


Şekil 49. Tablet sertleştirme işleminin sıcaklık zaman çizelgesi



Şekil 50. Üretilen Bi2212 hedefin fotoğrafı

Yaptığımız 50 üzeri süperiletken Bi2212 kaplama sonucunda hedef, üzerinden koparılan parçacıklar dolayısıyla aşınmıştır (Şekil 52). Kplama süresinin çoğu örnek için 5 saat olduğu düşünöldüğünde hedefin bu kadar aşınması normal olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle yeni hedef üretimine başlanmıştır. Ayrıca hedefin bu kadar hızlı aşınmasının bir sebebi de uygulayabildiğimiz yetersiz basıncın gözenekli hedef oluşumuna neden olması olarak tahmin edilmektedir.



Şekil 51. Üretilen Bi2212 hedefin bakır metal kap içinde birleşirilmiş halinin kaplama öncesi fotoğrafı



Şekil 52. Üretilen Bi2212 hedefin bakır metal kap içinde birleşirilmiş halinin 60 örnek kaplama sonrası fotoğrafı

8.2 Bi2212 İnce Filmlerinin Büyütülmesi

Mıknatıssal saçtırma sistemimiz yüksek vakumda çalışan bir sistemdir ve resmi Şekil 53'de görülmektedir. Daha önceki çeşitli projelerimizde de farklı tasarımlarda DC ve RF magnetron sistemleri kullanılmıştır (Yazıcı vd., 2015 ; Koseoğlu vd., 2015). Sistemde su soğutma kanalı, gaz giriş kısmı ve güç kaynağı bağlantıları bulunmaktadır. Yüksek vakumda (2.0×10^{-6} Torr altı) çalışabilmek için mekanik pompa ve turbo moleküler pompa kullanılmıştır. Örnek tutucuya yerleştirilen örnek yüzeyi ısıtılır. Sistemin basıncı kaplama öncesi cold kathode ile ölçülür ve argon gazı gaz kütle denetleyicisi ile sisteme gönderilir. Plasmayı oluşturabilmek için DC voltaj uygulanmıştır. Argon gazı iyonlaştırılarak hedefe doğru hızlandırılıp ve hedef atomlarını kopartıp altağa biriktirerek kaplama yapılmıştır.



Şekil 53. DC ve RF magnetron sputtering sistemimiz



Şekil 54. RF magnetron sputtering sisteminde kullandığımız satın alınan Bi2212 hedef

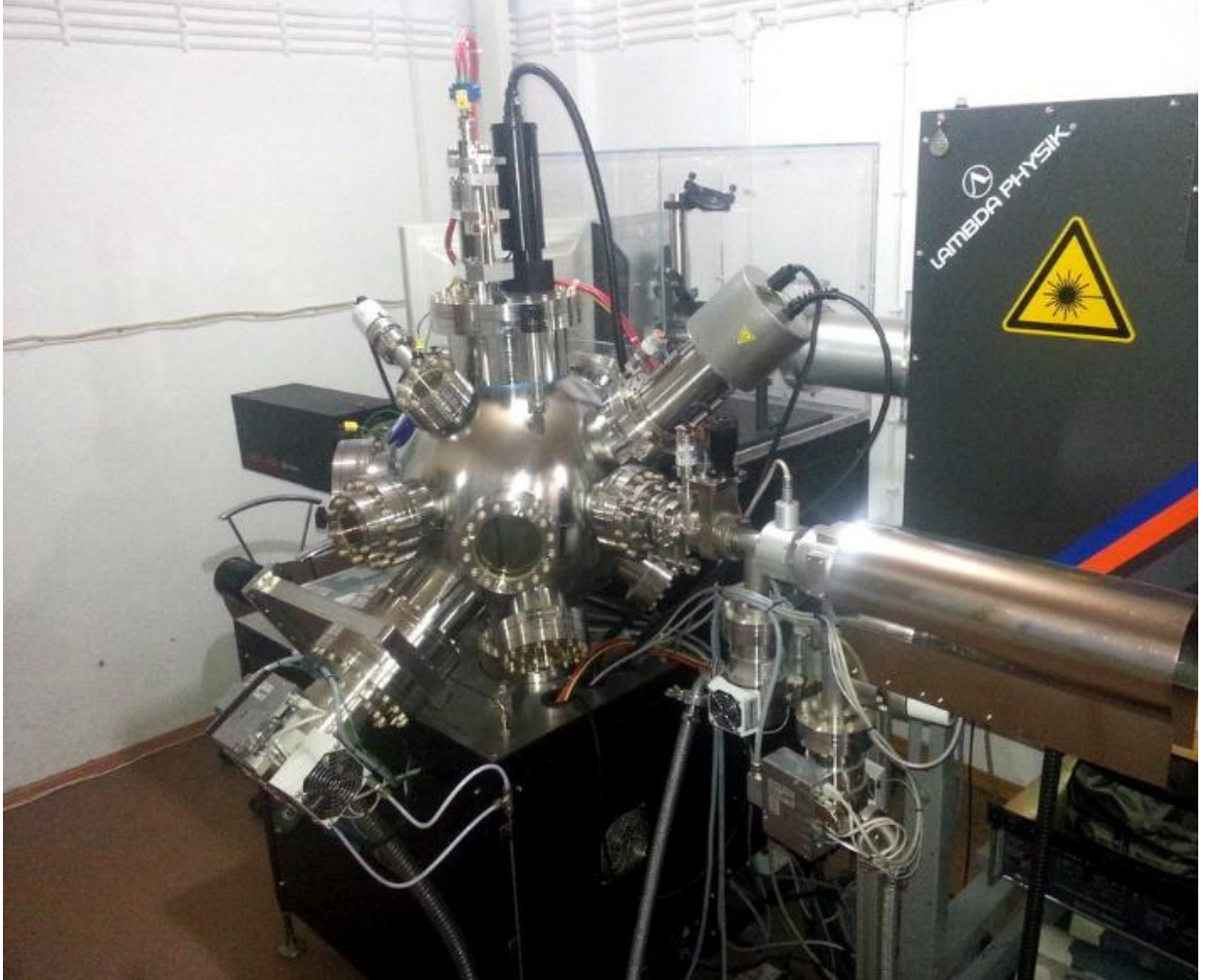
Hazırladığımız Bi2212 hedef sisteme yerleştirilmiş ve kaplama parametreleri değiştirilerek safir ve MgO alttaş üzerine DC magnetron saçtırma sisteminde kaplama yapılmıştır. Buna ek olarak satın aldığımız Bi2212 hedef de (Şekil 54), sisteme yerleştirilmiş ve farklı parametreler kullanılarak safir ve MgO alttaş üzerine RF magnetron saçtırma tekniği (satın alınan hedef yalıtkan olduğu için RF güç kaynağı kullanılmıştır.) ile kaplama yapılmıştır. Kapladığımız Bi2212 ince filmlerinin kaplama parametreleri, örnek numaraları ile birlikte EK 1’de verilmiştir. Kaplama parametreleri (Güç, Alttaş sıcaklığı, basınç değeri, gönderilen Argon ve Oksijen gazının oranı) süperiletken ince filmin fazı ve kalitesi (yapısal kararlılık, kritik sıcaklık, kritik akım değerleri vs.) açısından oldukça önemlidir (Uchiyama vd., 2007; Sozer vd., 2007; Levinson vd., 1988). DC magnetron saçtırma tekniği ile kaplanan filmler optiksel ve yapısal olarak karakterize edilmiştir. Ayrıca darbeli Lazer Yığma Sistemi (PLD) kullanılarak, $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212) büyütülmesi için hazırlanan 30 mm çapında ve 6.7 mm yüksekliğindeki tablet (Şekil 55) PLD vakum odasına 2”lik hedef tutucuya yerleştirilmiştir.



Şekil 55. Bi2212 Hedef (PLD sistemi için hazırlanan)

10 x 10 mm ölçülerindeki MgO altlıkların organik kirlere arındırılması amacıyla önce aseton, sonra metanol ile ultrasonik temizleyicide 8 dakika boyunca temizlenmiş ve daha sonra saf sudan geçirilmiştir. Temizlenen MgO altlıklar, TED Pella şirketine ait termal iletkenliği yüksek "200 Silver Paint" sıvı gümüş ile altlık tutucuya yerleştirilmiş ve 45 Watt'lık halojen lamba yardımıyla yarım saat süreyle kurutulmuştur.

Büyütme için Atatürk Üniversitesi nanobilim ve nanomühendislik bölümünde bulunan Neocera marka "Complete P180 PLD Laboratory" model Darbeli Lazer Yığıma Sistemi (PLD) (Şekil 56) kullanılmıştır. Kaplama parametrelerinin belirlenmesi amacıyla literatürde bulunan çalışmalar incelenmiştir (Ishii ve Hatano, 2000; Ishii vd., 2002; Mua vd., 2011; Nane vd., 2013; Ranno vd., 1993; Zhu vd., 1993).



Şekil 56. Atatürk Üniversitesinde bulunan Complete P180 PLD Sistemi

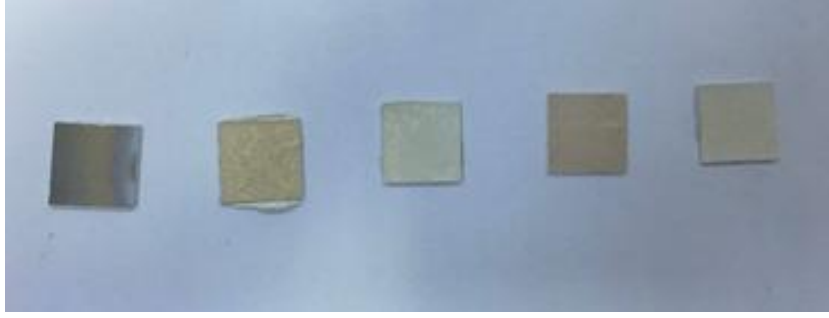
Büyütme işlemi bilgisayar kontrollü olarak programlanabildiği için, hazırlanan numunelerde belirlenen değişkenler dışında ki deney şartları birbirinin aynısıdır. Literatürde PLD ile MgO üzerine Bi2212 (Bi2212/MgO) büyütme için farklı grupların parametreleri incelenmiş ve elde edilen değerler Tablo 2.'de verilmiştir.

Tablo 2. Literatürdeki Bi2212/MgO parametreleri

	A	B	C	D	E	F
Büyütme Basıncı (mTorr)	100	100	150	250	75	150
Tekrarlama Frekansı (Hz)	1	1	3	5	5	0,5 – 3,3
Büyütme Sıcaklığı (°C)	600-650	660	730	600	660-700	740
Hedef-Altılık Mesafesi (mm)	30	30	-	45	-	70
Lazer Uyarma Enerjisi	-	-	300 mJ	2,39 J/cm ²	1 J/cm ²	2 J/cm ²

Hedef-altılık mesafesi 5 cm olarak ayarlanmış ve lazerin hedef pellet üzerindeki enerjisi 1,6 J/cm²'ye (200 mJ Lazer çıkış enerjisi) sabitlenmiştir. Kristalleşmenin sağlanabilmesi için ilk 1000 atış 1 Hz'de, sonraki 5000 atış ise 10 Hz'de yapılmıştır. Büyütme sıcaklığı alttaş üzerinde 650 °C ve 700 °C olarak belirlenmiştir, altlık ısıtma hızı 650 °C'ye kadar 20 °C/dakika, 700 °C'e ise 10 °C/dakika seçilmiştir. Büyütme öncesi vakum odasının yabancı atomlardan arındırılması amacıyla taban basıncı 9x10⁻⁶ Torr olarak kullanılmıştır. Büyütme basıncı, oluşan plazmanın geometrik özelliklerine göre 50-150 mTorr aralığında, 25 mTorr adımlı olarak belirlenmiş ve büyütme sırasında %99.999 saflıkta oksijen gazı kullanılmıştır. Numune soğutulurken çatlama olmaması için, dakikada 10 °C ile 250 °C'ye kontrollü soğutma yapılmış, sonrasında doğal soğumaya bırakılmıştır. Örnek dışarı çıkartılmadan önce %99.999 saflıkta Azot ile vakum odası atmosfer basıncına getirilerek örnekler

çıkartılmıştır. Örnek resimleri Şekil 57’de gösterilmiştir. Bu örneklerin yapılan elektriksel ölçümler sonucunda iletken olmadıkları anlaşılmıştır. Aynı zamanda alttaşlar üzerinde renk değişmesi veya Bi2212 büyümesinden dolayı beklediğimiz koyu renk elde edilememiştir. Örneğin 5000 atışın, 20-30 bine çıkarılmasının film oluşmasını sağlayacağı tahmin edilmektedir. Dolayısıyla filmlerin daha uzun süreli kaplanmasına karar verilmiştir. Ancak Atatürk Üniversitesi’ndeki PLD sistemde olan arıza nedeniyle kaplama çalışmalarına devam edilememiştir.



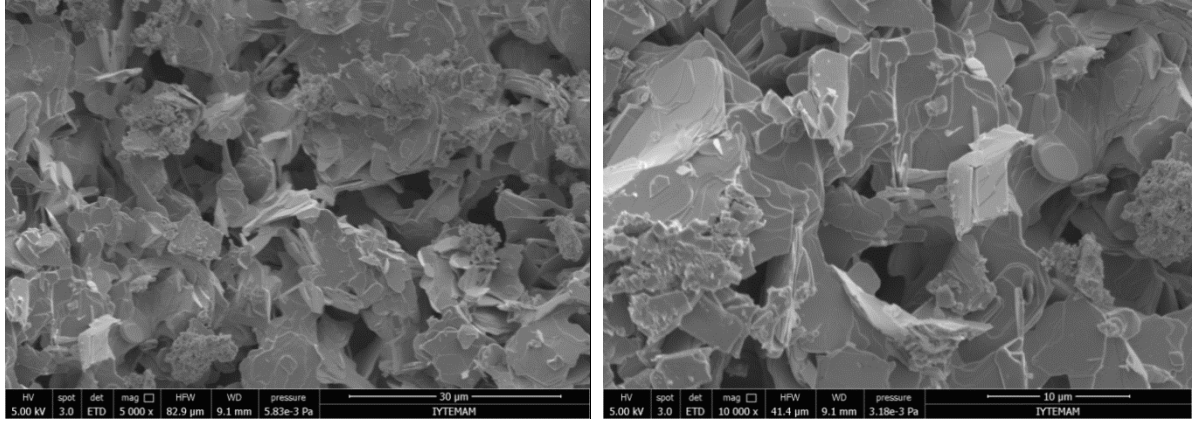
Şekil 57. PLD sistemi ile kaplanan örneklerin resimleri

8.3 Bi2212 İnce Filmlerin Karakterizasyonu

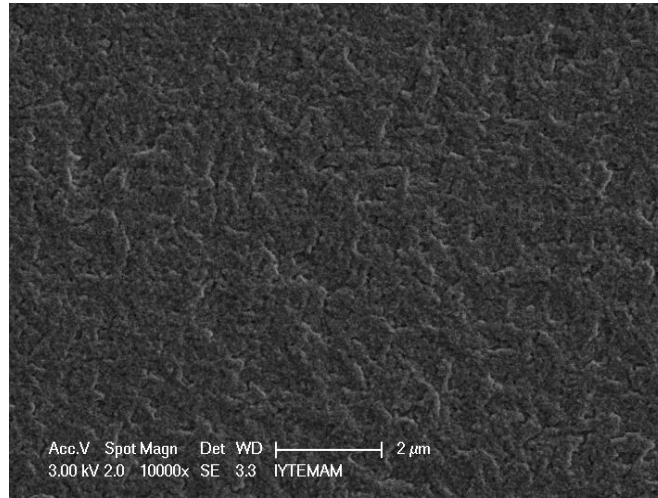
Hazırladığımız Bi2212 hedefin ve DC magnetron sistemi ile kapladığımız ince filmlerin yapısal ve elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır. BSCCO ince filmlerinin yüzey analizi için Taramalı Elektron Mikroskobu ile SEM görüntüleri alınmıştır (Şekil 58). SEM ile malzemelerin yapıları mikro ve nano boyutta görüntülenebilir. Kapladığımız BSCCO incefilmlerin SEM görüntülerinde ince film yüzeylerinde gözlemlenmesi gereken mikro tanecikli yapı görülemedi. Kompozisyon belirleme için en bilinen yöntem EDX (Enerji Dağılımlı X-Işınları Mikroanaliz Spektrometresi) analizidir. İYTE Malzeme Araştırma Merkezinde (MAM) yapılan EDX analizinin sonucu ile BSCCO ince filmlerimizin elementel içeriği nicel ve nitel olarak bulunmuştur ve haritalandırma ile SEM görüntüsü üzerinden elementlerin dağılımı verilmiştir. Örneklerin içindeki elementlerin yüzdeleri, elementlerin piklerinin altındaki alanlarla orantılıdır.

8.3.1 Taramalı Elektron Mikroskobu görüntüleri

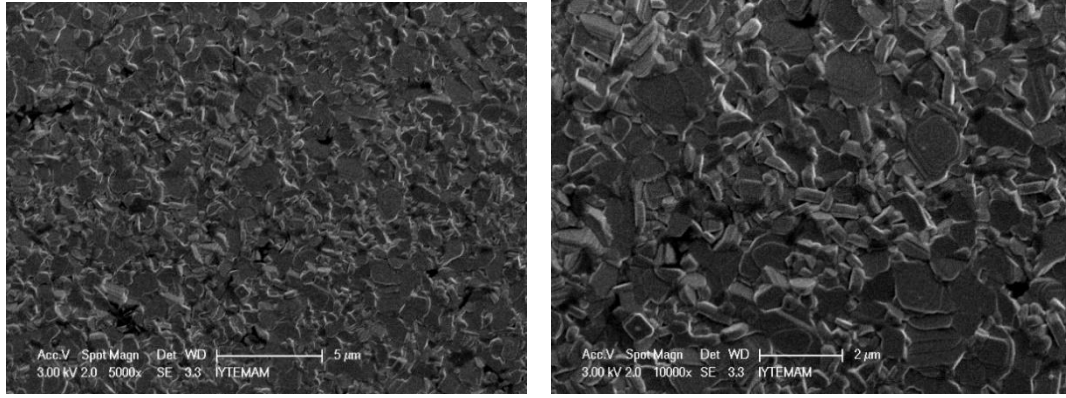
Hazırladığımız Bi2212 hedefin ve farklı büyütme parametreleriyle kaplanan Bi2212 ince filmlerin yüzey analizi için alınan SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 59-61'de verilmiştir.



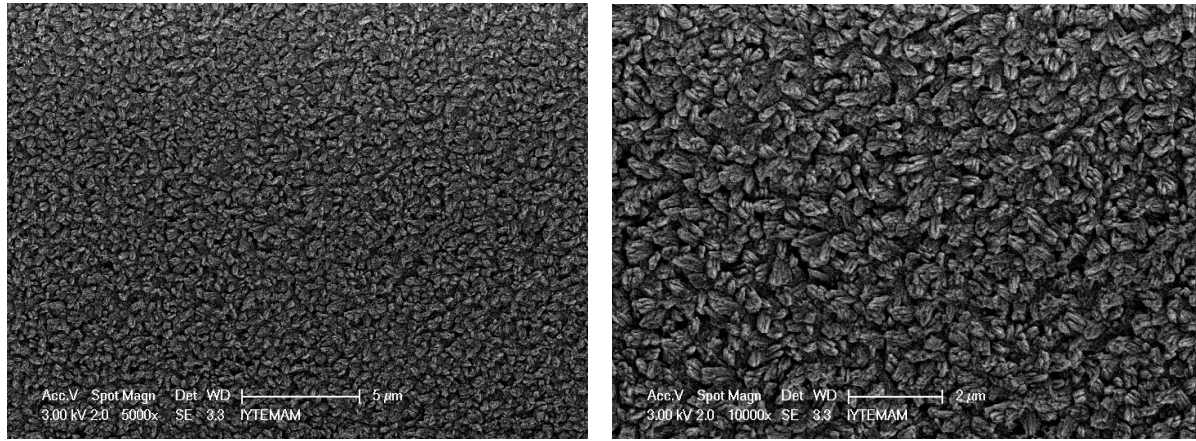
Şekil 58. Hazırlanan Bi2212 hedefinin SEM görüntüsü



Şekil 59. YD37 örneğinin SEM görüntüsü (30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı)



Şekil 60. YD39 örneğinin SEM görüntüsü (50 sccm Argon 2.5 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı)



Şekil 61. YD 48 örneğini SEM görüntüsü (120 sccm Argon 30 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı)

Bi2212 gibi katmanlı seramik süperiletkenlerdeki düşük geçiş sıcaklığı ve kritik akım yoğunluğunun en önemli nedeni tanecikli yapıda olmalarıdır (Kim vd., 2002 ; Baker vd., 1994 ;Sozeri vd., 2007). Bu nedenle tanecikler arasında güçlü bağların olması önemlidir. Beklediğimiz tanecikli yapılar SEM görüntülerinde açıkça gözlemlenmiştir. SEM görüntülerini incelediğimizde, ince filmlerde gözlemlenen taneciklerin rastgele yönelmiş olduğu ve tanecik sınırlarının birbirleri ile zayıf bağlar oluşturacak şekilde temas halinde oldukları görülmektedir. Bu da yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin karakteristik özelliklerinden biridir. YD 39 örneğinde en fazla olmak üzere, kaplanan örneklerde genel olarak tabakalı bir yapı olduğu fakat kaplama sıcaklığı azaldıkça homojenliğin azaldığı görülmektedir. Buna ek

olarak büyük parçaların oluşturduğu grainlerin rastgele yöneldiği görülmektedir, XRD sonuçlarından da gözlemlenen safsızlıkların neden olduğu küçük boyutlu kümeleşmiş yapılar görülmektedir.

Tablo-3, Tablo-4 ve Tablo-5'te farklı parametrelerle kaplanan Bi2212 ince filmlerinin, aynı parametrelerle farklı alttaşlara kaplanan Bi2212 ince filmlerinin ve üretilen ve satın alınan Bi2212 hedeflerin EDX analizi verilmiştir. Tablo-3'e bakıldığında, 120 sccm Argon ve 40 sccm oksijen gönderilerek yapılan ince film kaplama Bi2212 fazına en yakın sonucu vermiştir.

Tablo 3. Üretilen ve satın alınan Bi2212 hedeflerin EDX analizi

Element	(At%) Kendi Ürettiğimiz Hedef	(At%) Satın Alınan Hedef
Bi	16.41	17.07
Sr	11.78	15.57
Cu	9.43	10.15
O	31.35	34.22
Ca	4.08	5.94
C	26.96	17.05

Tablo 4. Farklı parametrelerle kaplanan Bi2212 ince filmlerinin EDX analizi

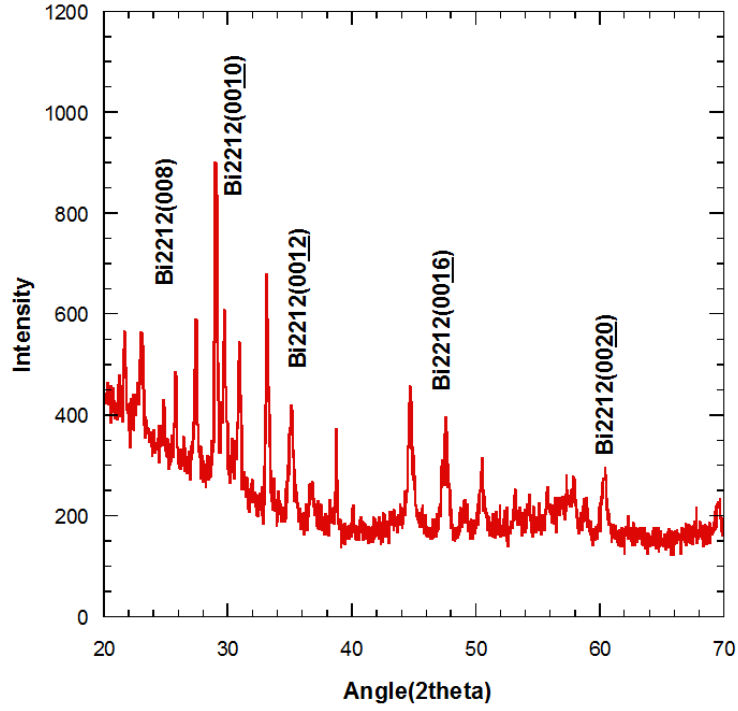
Element	(At%) Ar:60 sccm O: -	(At%) Ar:50 sccm O:2.5 sccm	(At%) Ar:120 sccm O:40 sccm	(At%) Ar:120 sccm O:30 sccm	(At%) Ar:30 sccm O:50 sccm	(At%) Ar:30 sccm O:50 Sccm	(At%) Ar:30 sccm O:50 sccm	(At%) Ar:50 sccm O:12.5 sccm	(At%) Ar:150 sccm O:3 sccm	(At%) Ar:70 sccm O: 15 sccm
Bi	21.38	19.77	15.31	18.84	15.62	3.63	5.65	16.75	21.04	19.76
Al	0.52	2.49	6.16	1.47	1.15	17.90	5.25	1.63	1.36	4.44
Sr	15.19	16.67	15.22	15.44	14.51	16.44	18.43	15.99	13.13	14.65
Cu	14.20	15.67	15.31	15.57	15.95	16.86	19.10	19.05	14.92	15.35
O	8.32	39.07	40.11	42.17	46.29	41.20	47.45	39.64	43.34	39.44
Ca	3.54	6.32	7.89	6.50	6.47	3.96	4.12	6.95	6.21	6.35

Tablo 5. Aynı parametrelerle farklı alttaşlara kaplanan Bi2212 incefilmlerinin EDX analizi

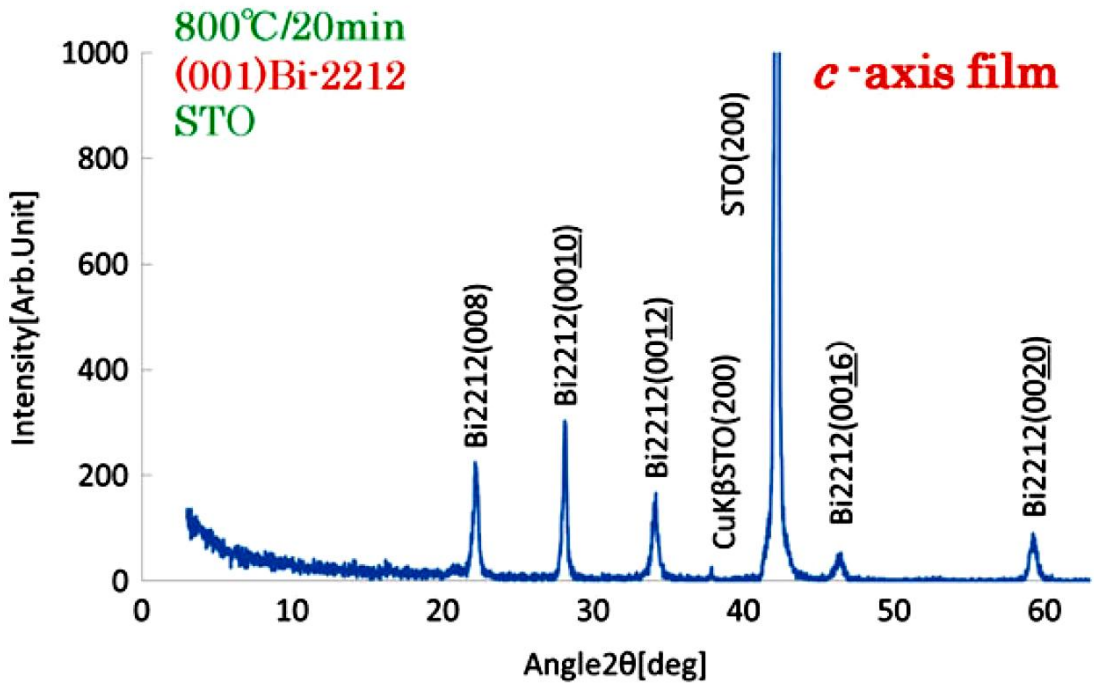
Element	(At%) MgO Alttaş	(At%) Safir Alttaş
Bi	3.68	4.76
Al & MgO	30.47	27.65
Sr	10.88	12.99
Cu	13.49	13.75
O	38.53	37.26
Ca	2.95	3.60

8.3.2 XRD Analizi Sonuçları

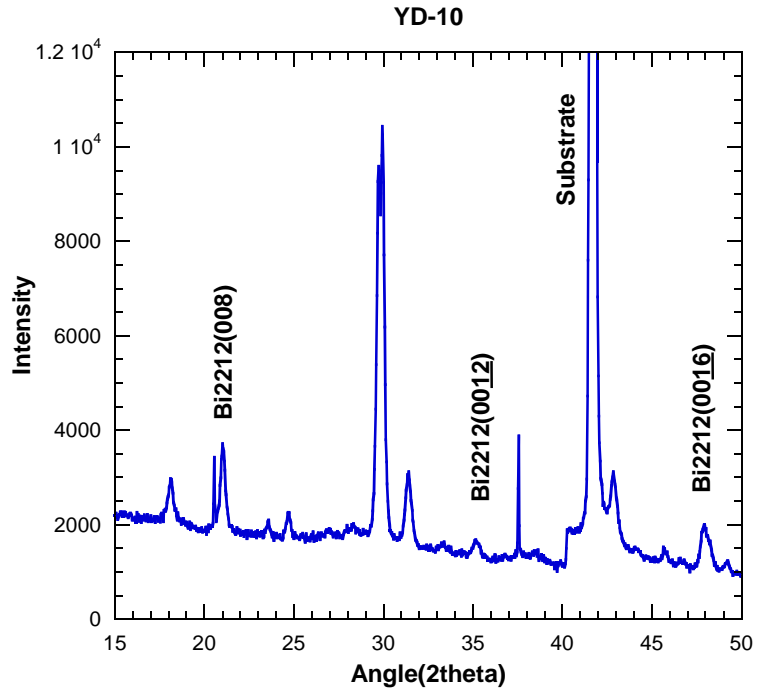
Kaplanan ince filmlerin yapısal karakterizasyon yöntemlerinden birisi de x-ışını kırınım ölçümlerinin incelenmesidir. Bu ölçümlerden yararlanılarak, filmin kristal yapısı, örgü parametreleri, Miller indisleri hakkında bilgi edinilebilir. Ayrıca örnekteki farklı süperiletken fazları ve safsızlık fazlarını saptamak için de gereklidir. Bu amaçla hazırlanan target ve kaplanan ince filmlerin XRD analizi yapılmıştır. Bu analizler, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Araştırma Merkezinde (MAM), Philips X'pert Pro difraktometresinde $\text{CuK}\alpha$ x-ışınlarından yararlanılarak $20 \leq 2\theta \leq 70$ aralığında gerçekleştirilmiştir. Hazırladığımız Bi2212 hedefin XRD sonucu Şekil 62'de verilmektedir. Bi2212'nin yüksek- T_c ve düşük- T_c fazlarının pikleri referans çalışma (Endo vd., 1992) (Şekil 63) yardımıyla belirlenebilmektedir. Bu proje kapsamında kapladığımız bazı Bi2212 ince filmlerin XRD analizleri sırasıyla Şekil 63-64-65-66-67-68-69-70'de gösterilmiştir.



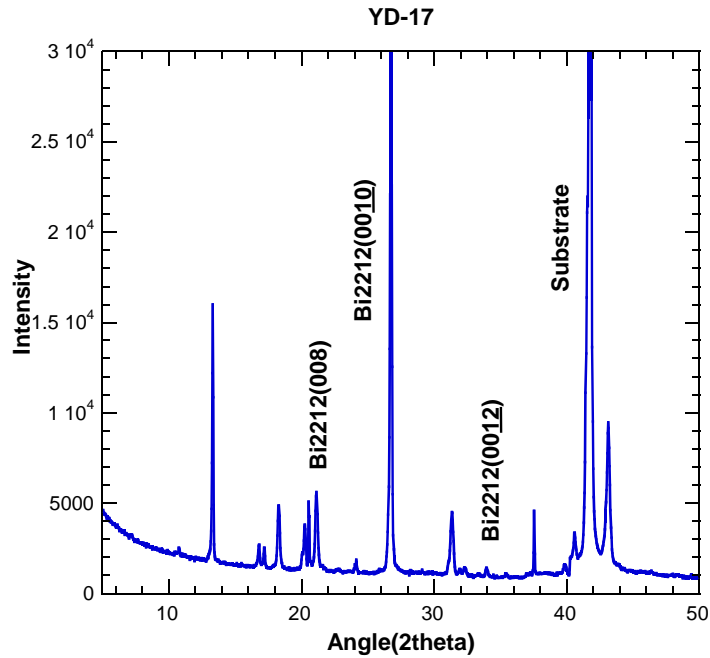
Şekil 62. Hazırlanan Bi2212 hedefin XRD analiz sonucu



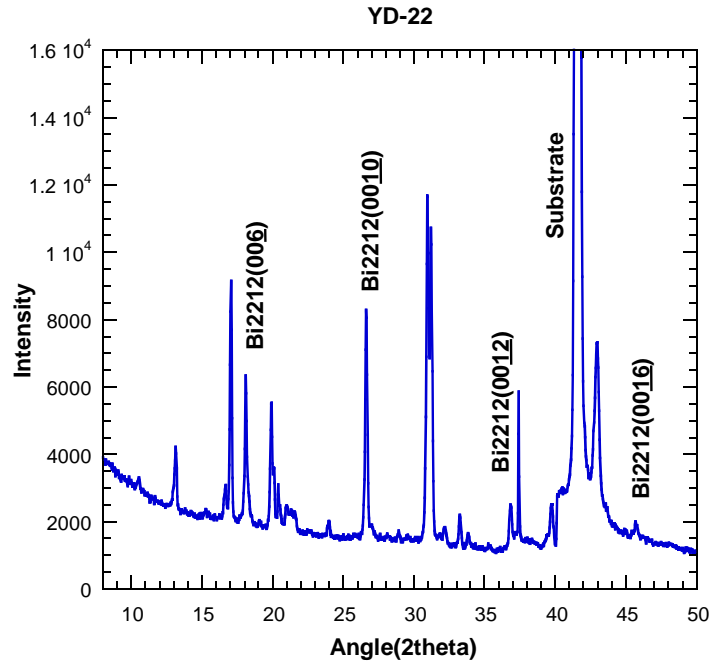
Şekil 63. Referans olarak kullanılan c-ekseni boyunca büyütülen Bi2212 filmlerin XRD analizi (Endo vd., 1992)



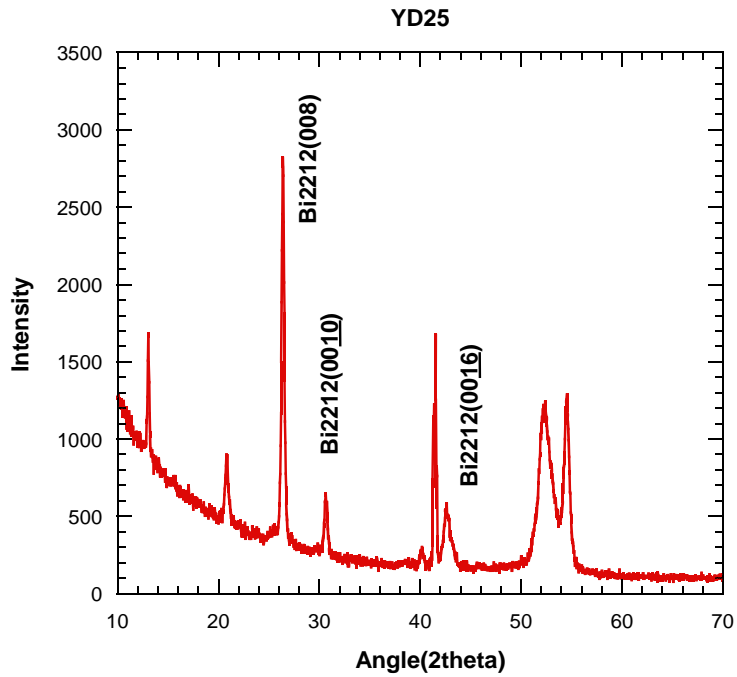
Şekil 64. YD 10 örneğinin XRD analiz sonucu (50 sccm Argon 20 sccm Oksijen gönderilerek 1.5 saat kaplama yapıldı).



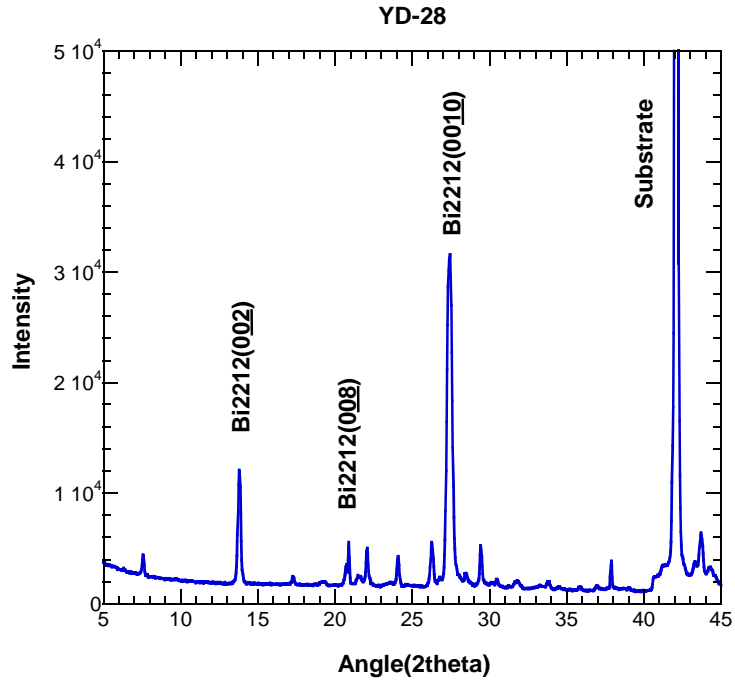
Şekil 65. YD 17 örneğinin XRD analiz sonucu (30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 2 saat kaplama yapıldı).



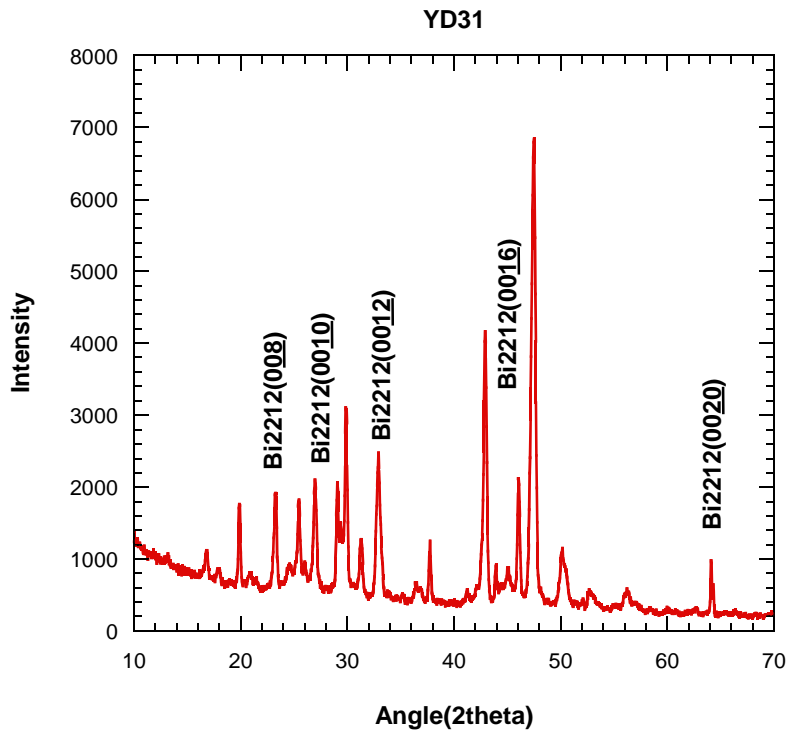
Şekil 66. YD 22 örneğinin XRD analiz sonucu (20 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı).



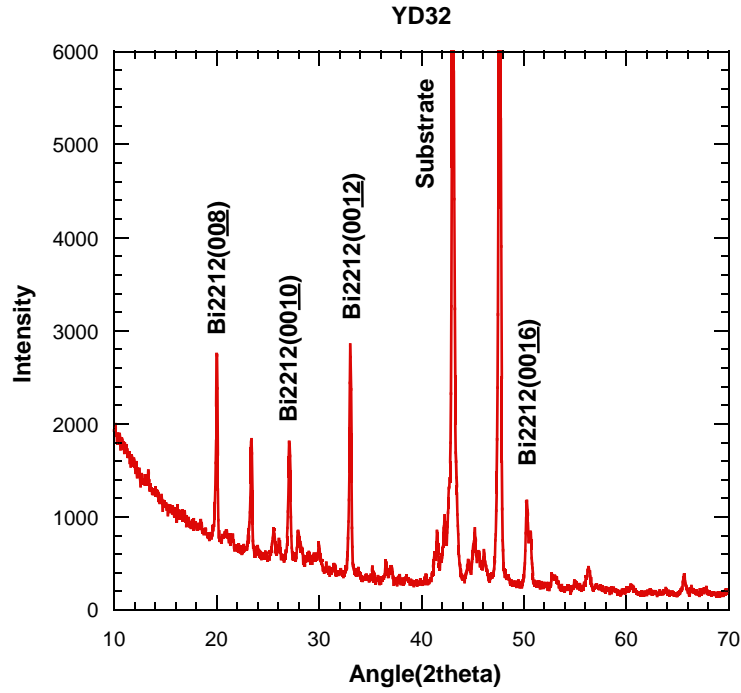
Şekil 67. YD 25 örneğinin XRD analiz sonucu (30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı).



Şekil 68. YD 28 örneğinin XRD analiz sonucu (30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 5.5 saat kaplama yapıldı).



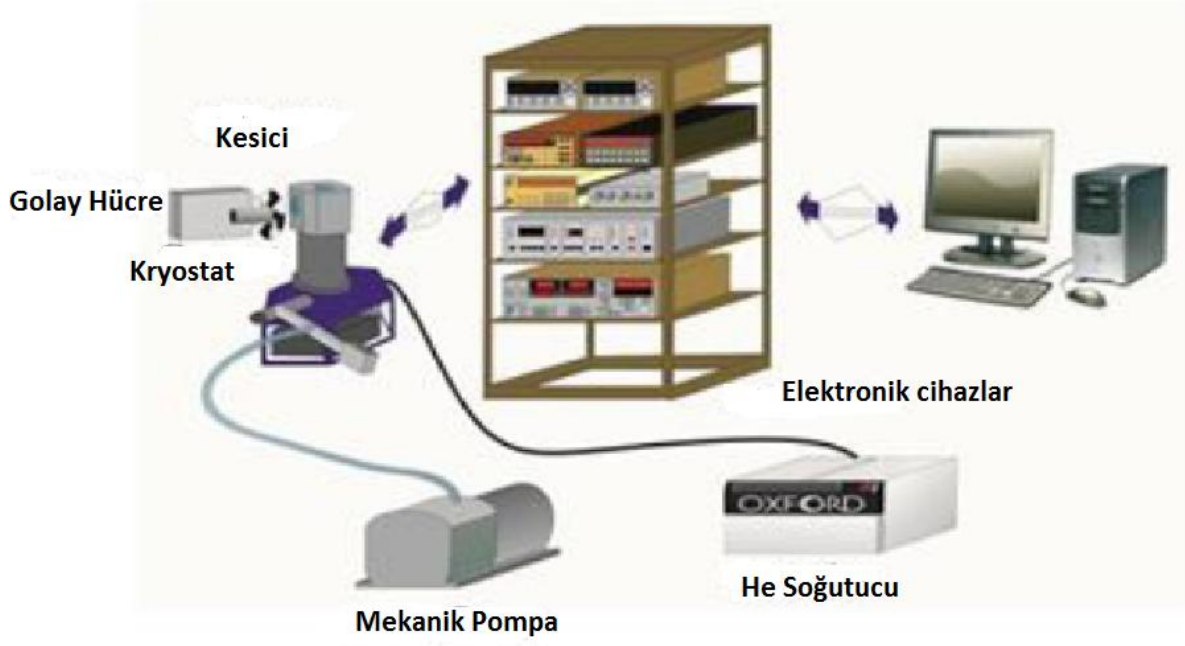
Şekil 69. YD 31 örneğinin XRD analiz sonucu (50 sccm Argon 12.5 sccm Oksijen gönderilerek 5 saat 50 dk kaplama yapıldı)



Şekil 70. YD 32 örneğinin XRD analiz sonucu (100 sccm Argon 25 sccm Oksijen gönderilerek 1.5 saat kaplama yapıldı).

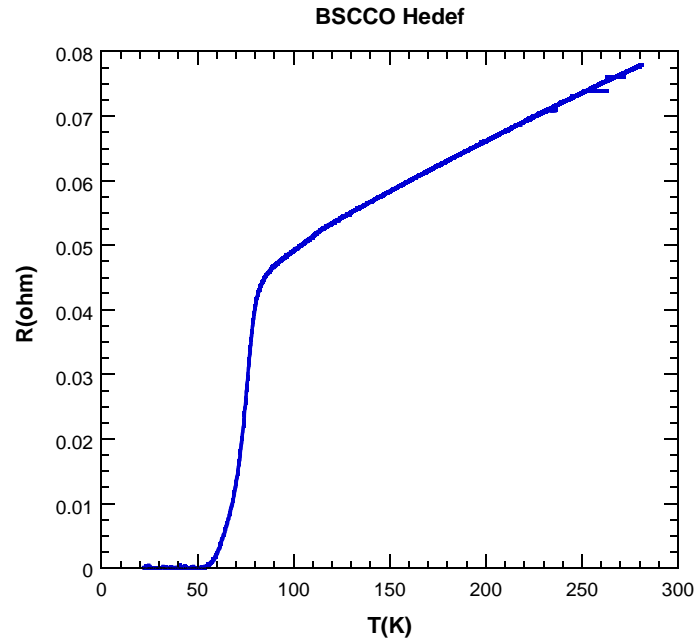
8.3.3 Bi2212 İnce Filmlerinin Direnç-Sıcaklık (R-T) Ölçümleri

DC mıknatıssal saçtırma yöntemiyle (001 yöneliminde) safir ve MgO altaşlar üzerine kaplanan Bi2212 ince filmlerin direnç sıcaklık ölçümleri kapalı devre kroyostat sistemimizde örnek üzeinden 4 uç alınarak yapılmıştır. İnce filmlerin R-T ölçümlerinin yanısıra, yığın halde bulunan Bi2212 hedeften de ince küçük bir parça ayrılmış, gümüş boya ile 4 uç alınarak ölçümü alınmıştır. Kapalı devre soğutma sistemi süperiletken malzemelerin sıcaklığını kritik sıcaklığın (T_c) altına düşürmek ve direnç-sıcaklık davranışlarını ölçmek için kullanılmıştır. Sistem, vakum pompası, kompresör, su soğutma sistemi ve sıcaklık denetleyicisini kapsamaktadır. Sistemin çalışma prensibi soğutucunun soğuk basınçta He gazının genişlemesine dayanır. İlk olarak He gazı su soğutma kompresörü ile 16.5 bar a sıkıştırılır, daha sonra sıkıştırılmış gaz esnek hatla soğutucuya transfer edilir. Soğuk başta (Cold head) He gazının sıkıştırılması ile soğutma üretilir ve sıcaklık denetleyicisi ile kontrol edilir. Malzeme tutucu ile soğutucunun koruyucusu arasındaki bölge vakumla termal izolasyon yaratmak için pompalanır ve etraftaki termal etkileri minimumda tutar. Gerekli düşük sıcaklığa ulaşmak için vakum 10^{-4} veya 10^{-5} mbar olmalıdır. Kullandığımız cihazlar bilgisayarla koordine edilebilir ve birden çok cihaz kontrolünü data analizlerini ve data depolaması içeren Labview programıyla kontrol edilir.



Şekil 71. Kapalı devre Helyum ile R-T ölçüm sistemi

Şekil 72'de hazırladığımız Bi2212 hedefinin R-T ölçümü görülmektedir. Süperiletken hale geçiş 85 K civarında gözlemlenmiştir, bu hedefin beklediği gibi 2212 fazında olduğunu göstermektedir. 4 uç ölçümünde T_c değerinin altında sıfır direnç değeri görülmektedir.



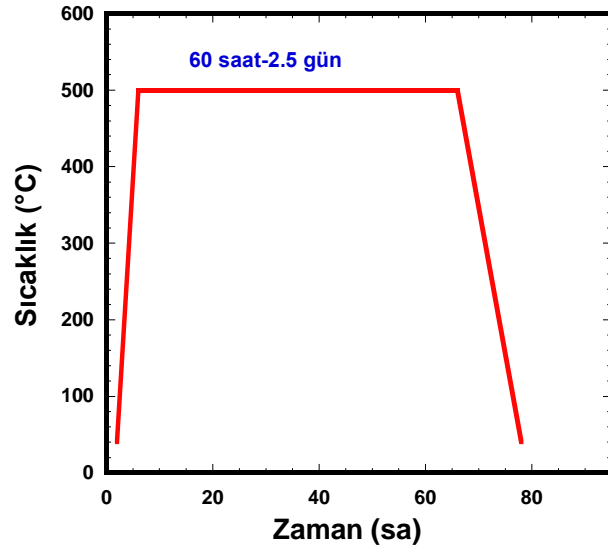
Şekil 72. Hazırlanan Bi2212 hedefin R-T ölçümü grafiği

R-T ölçümü süperiletken filmin fazını, geçiş sıcaklığını, doping düzeyi gibi özellikleri belirlemek açısından gereklidir. Üretilen ince film örneklerden sırasıyla YD 25, YD 27, YD 37, YD 37-tavllanmış, YD 39, YD 39-tavllanmış numaralı örneklere ait direnç sıcaklık grafikleri Şekil 75-76-77-78-79'da görülmektedir. Grafiklerde kritik sıcaklıkta süperiletken hale faz geçişleri görülmektedir ancak 4 uç ölçümünden beklenen sıfır direnç gözlemlenememiştir. Gözlemlenen kritik sıcaklık değerleri 88 ve 91 K arasındadır.

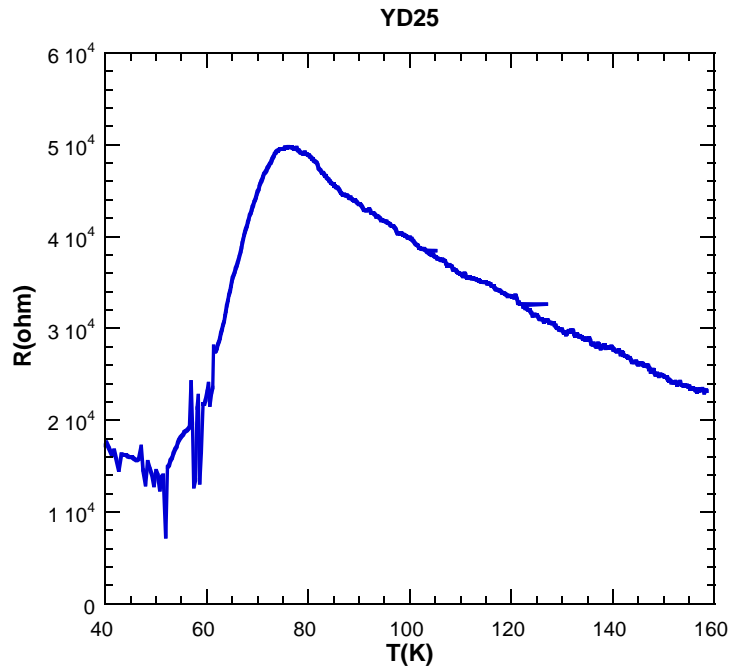
Mıknatıssal saçtırma esnasında hedef ile aynı stokiyometride kaplanamamıştır, özellikle oksijen miktarında değişim ve Bismuth kaybı gözlemlenmiştir. Tablo-4'deki EDX değerlendirmesinden bu sonuç görülebilir. Kaplanan Bi2212 filmlerin oksijen miktarının ayarlanması için Şekil 73'de gösterilen tavlama düzeneği kullanılmıştır. Isıl işlem uygulanarak 200 sccm Oksijen geçirilip Şekil 74'deki tavlama adımları kullanılmıştır. Buna rağmen tamamen süperiletken fazın olduğu Bi2212 ince film yapısına ulaşamamıştır.



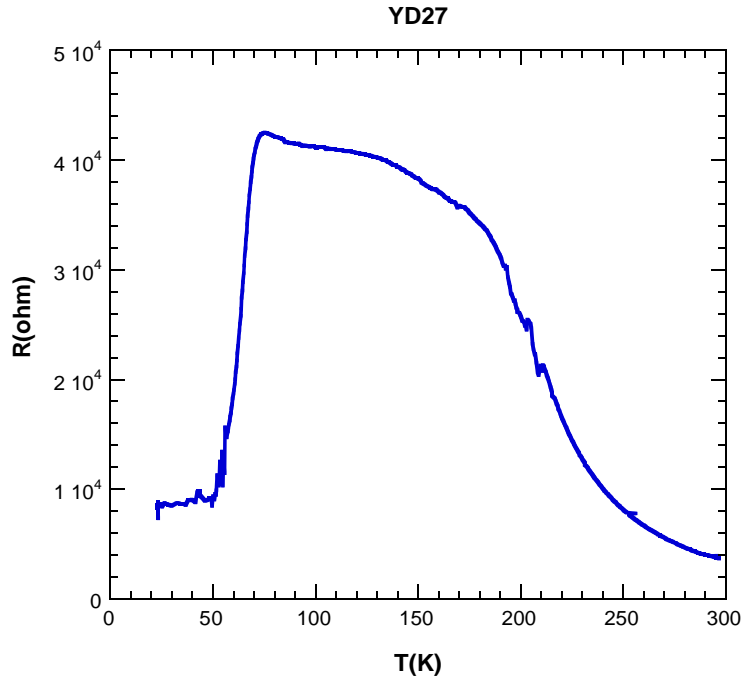
Şekil 73. Oksijen geçişli tavlama düzeneğinin resmi



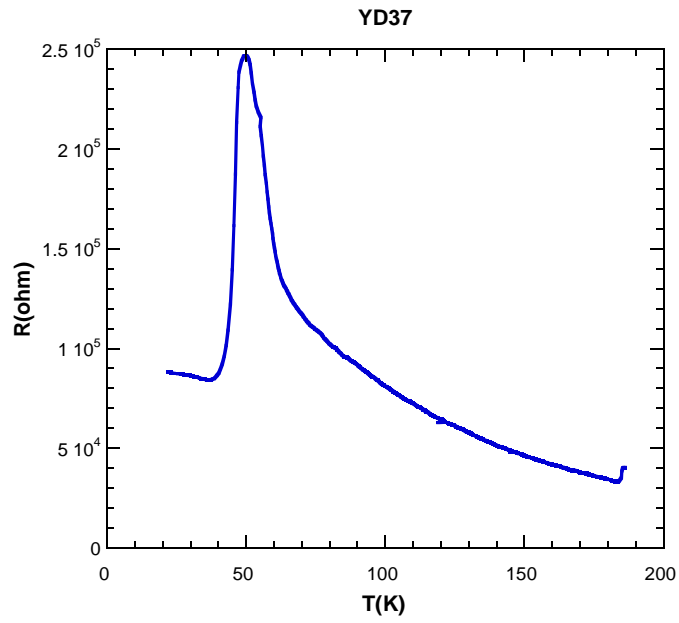
Şekil 74. Tavlama düzeneğinin sıcaklık-zaman grafiği



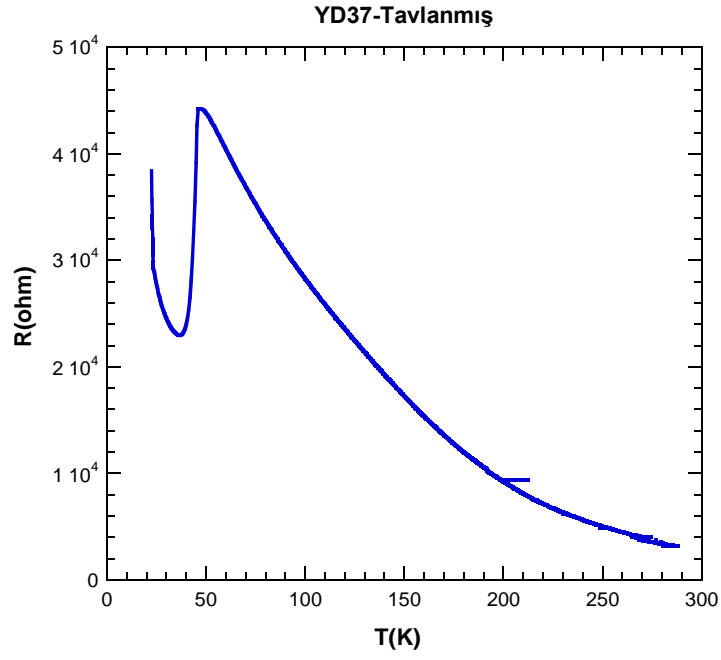
Şekil 75. YD 25 örneğinin R-T ölçümü grafiği (30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı).



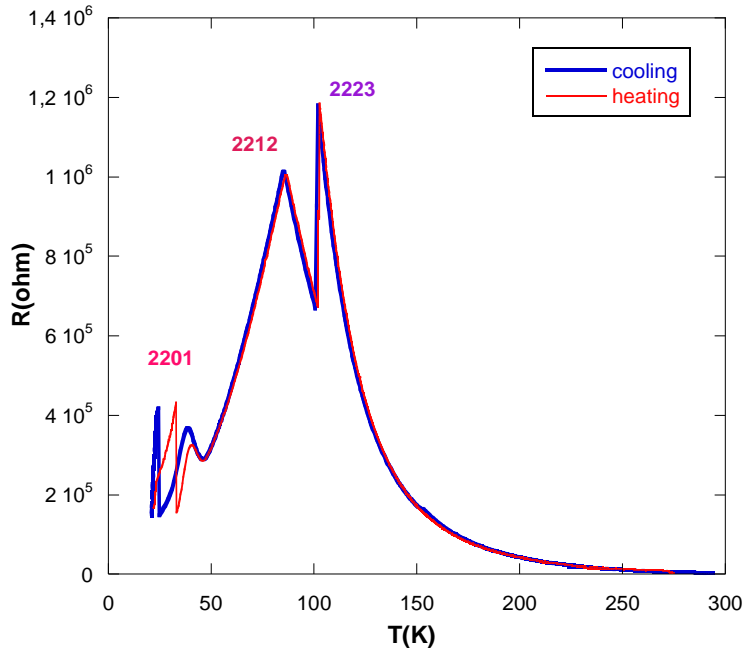
Şekil 76. YD 27 örneğinin R-T ölçümü grafiği (30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı).



Şekil 77. YD 37 örneğinin R-T ölçümü grafiği (Tavlama öncesi)(30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı).

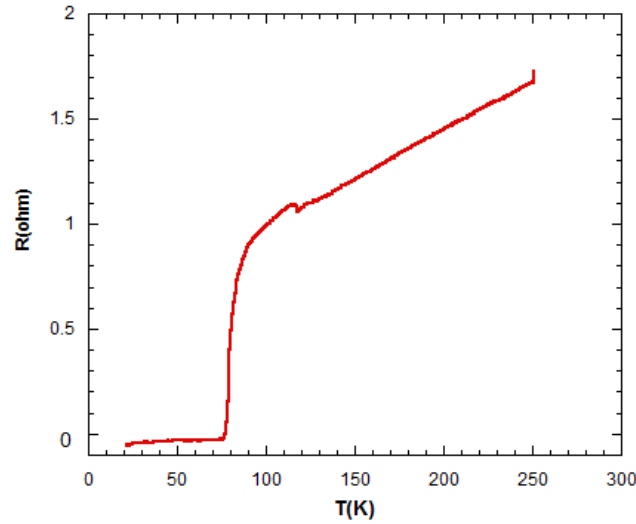


Şekil 78. YD 37 örneğinin R-T ölçümü grafiği (Tavlama sonrası) (30 sccm Argon 50 sccm Oksijen gönderilerek 3 saat kaplama yapıldı)



Şekil 79. YD 56 örneğinin R-T ölçümü grafiği (ısınrken ve soğurken) (120 sccm Argon 30 sccm Oksijen gönderilerek 2 saat 15 dakika kaplama yapıldı).

Projede BSCCO filmler istediğimiz kalitede kaplanamayınca projenin B planında belirtildiği gibi, BSCCO filmleri kaplamak için farklı bir yöntem uygulanmıştır. Bu yöntemde, magnetron saçırma sistemlerimizde kullandığımız ve Bi2212 fazını elde etmek için gerekli oranlarda hazırladığımız Bi2212 öğütülerek toz haline getirilmiştir. Elde edilen toz alumina kap içerisine koyularak kalsinasyon ısıl işlemi tekrarlanmıştır. 100 mL aseton ile 50 mg Bi2212 toz karıştırılmış ve tabanı düz bir beher içine yerleştirilen MgO alttaşların üzerine konmuştur. Ultrasonik titreştirici içerisinde konan beher içerisindeki aseton tamamen uçuncaya kadar, yaklaşık 8-12 saat aralıklar ile titreştirilmiştir. Aseton uçunca beher içerisinde kalan Bi2212 tozunun MgO alttaş üzerine homojen bir şekilde kaplandığı gözlemlenmiştir. Çıkarılan örnekler 425°C'de 60 saat süre ile tavlansmıştır (DC miknatissal saçırma yöntemiyle kapladığımız filmler ile aynı tavlama düzeneği kullanılmıştır.). Hazırlanan örneklerde, 85-90 K arası süperiletken geçiş gözlemlenmiştir (Şekil 80). Örneklerin bazılarında tavlama sırasında yüzeyde kırık ve çatlak oluşumu gözlemlenmiştir (Şekil 81). Ayrıca filmler şekillendirebileceğimiz incelikte üretilmemiştir. Elektron demeti litografisi ile şekillendirme yaparken kullandığımız fotorezist en fazla 2 saat iyon demeti aşındırma işlemine dayanabilmektedir. Bu yöntem ile kapladığımız filmler yaklaşık 4 mikrometre kalınlıkta olduğu için ve bazı örneklerde tavlama sırasında yüzeyde bozulma, çatlak gibi kusurlar oluştuğu için iyi süperiletken geçiş gözlemlendiğimiz halde bu filmlerden filtre üretilmemiştir.

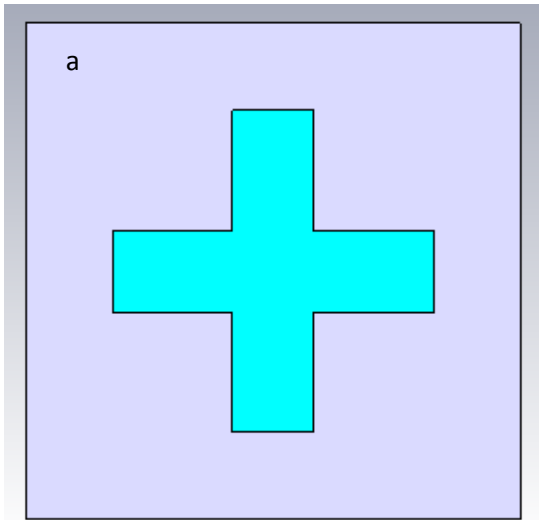


Şekil 80. Biriktirme yöntemiyle MgO alttaş üzerine büyütülen BSCCO filmin R-T grafiği.

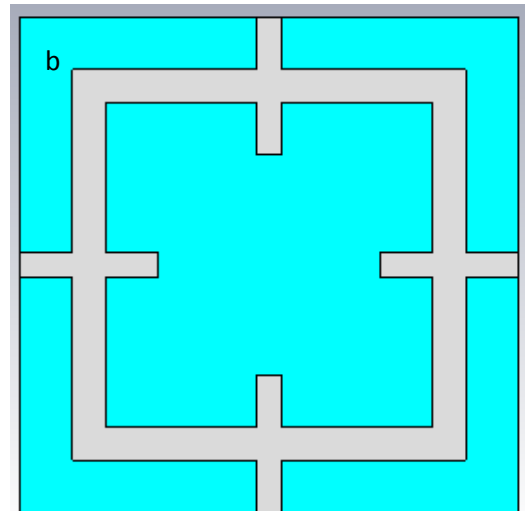


Şekil 81. Biriktirme yöntemiyle MgO alttaş üzerine kaplanan BSCCO filmin tavlama sonrası optik mikroskop görüntüsü.

Süperiletkenler kritik sıcaklık altında yalıtkan fazdan iletken faza geçen metallerdir. Kritik sıcaklık altında Kooper çifti adı verilen taşıyılara sahip olurlar ve iletkenlikleri artar (Schrieffer vd., 2007). Terahertz dalga boyu düşük enerjiye sahip olup Kooper çiftlerin yapısını bozmadığı için süperiletken materyellerin davranışlarını anlamak için oldukça uygun bir bölgedir (Glossner vd., 2012). Bi2212 numunesinde beklenen fazlar elde edilemeyince metamalzeme haline YBCO filmlerin getirilmesine ve incelenmesine karar verilmiştir. Kullanılan örnekler safir kristali üzerine büyütülmüş 80 nm kalınlığında süperiletken yttrium barium copper oxide (YBCO) dir. Safir üzerine 80 nm kalınlığında artı şekli verilmiş YBCO ve safir kristali üzerine 80 nm kalınlığında kuadkross olarak isimlendirilmiş yapılar üretilmiştir. Artı ve kuadkross yapıları Şekil 82’de gösterilmektedir.



Şekil 82. a) Safir üzeri artı şekilli metamalzeme



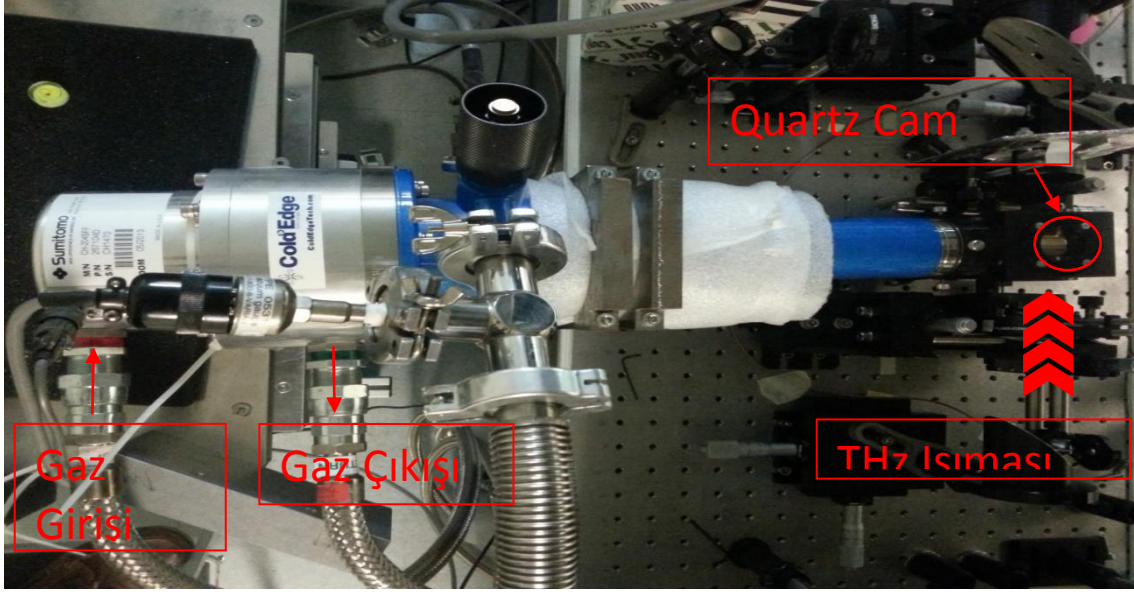
b) Safir üzeri kuadkross şekilli metamalzeme

Bu çalışmada hem altın ince filmlerinden hem de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -d yüksek T_c süperiletken ince filmlerinden, Kuadkross diye adlandırdığımız özgün metamalzeme filtre yapısı üretilmiştir. Bu proje için tasarlanan kuadkross filtre yapısı daha önce hiçbir çalışmada kullanılmamıştır ve YBCO ince filmlerinden üretilen metamalzeme filtre yapılarının özgün değeri filtre yapısının istenen frekans aralığında ve yüksek seçicilikte proje için tasarlanmış olmasıdır. Sıcaklığa bağlı rezonans davranışına sahip bu yeni dört köşeli dikdörtgen rezonatör, görüntüleme, algılama ve algılama uygulamaları için aktif, ayarlanabilir ve düşük kayıplı THz cihazları için büyük potansiyele sahiptir. Normal iletken metallere aksine, süper iletkenlerin sahip olduğu elektromanyetik özellikler, neredeyse ideal ve yeni metamalzeme yapılar üretmek amacıyla kullanılabilir. Süperiletkenlerin karmaşık iletkenliğini metallere kıyaslayacak olursak, uygulanan manyetik alana ve sıcaklığa bağlıdır. Bu, tasarlanan filtre yapısına ek elemanlara ihtiyaç duyulmadan süperiletken elemanın iletkenliğini doğrudan kontrol etme imkanı sağlar. Ayrıca, düşük sıcaklıkta üstün iletkenlik gösteren süperiletkenler kuantum davranışı gösteren elementleri entegre etme potansiyeline de sahiptir. Bu malzemelerde mikrodalga frekanslarındaki yüzey direnci değeri de küçüktür (Savinov vd., 2012). Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinde bulunan Josephson eklemleri süperiletken temelli yeni metamalzeme yapıları için çok uygundur. THz frekanslarında çalışan filtreler için, THz radyasyonunun kolayca Kooper çiftlerini kıramadığı yüksek sıcaklık süperiletkenleri uygundur. Yüksek- T_c süper iletken $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) filmlerin doğrusal olmayan THz geçirgenlik ölçümü Glossner ve arkadaşları tarafından yapılmıştır (Glossner vd., 2012). Bu malzemelerin doğrusal olmayan özellikleri, negatif indeks fotonların parametrik amplifikasyonu ve kayıpların azalmasını sağlar (Kurter vd., 2012).. Dahası, Josephson endüktansındaki değişikliklere uygun olarak, süperiletken meta atomları manyetik alan ve sıcaklık ile rezonans frekanslarının özünde ayarlanabilirliğini gösterir. Böylece, tasarlanan yapının geometrik parametrelerini ve sıcaklık bağımlı süper iletkenlik özellikleri değiştirilerek metamalzeme filtrenin rezonans frekansı ve geçirgenliğinin ayarlanabilir. Yüksek sıcaklık süperiletkeni YBCO'nun bu özellikleri, yüksek seçiciliğe sahip çok verimli ve kompakt metamalzeme filtreler üretilmesini sağlar. Bu tür filtreler, önceden belirlenmiş frekans bantlarında istenmeyen sinyalleri engellemek için THz görüntüleme sistemlerinde de kullanılabilir. Metalik altın ince filmler ve yüksek sıcaklık süperiletkeni YBCO ince filmleri şekillendirilerek oluşturulan özgün kuadkross metamalzeme yapılarının simülasyon ve deneysel ölçüm sonuçları bu filtrelerin THz frekans aralığında çalışan, aktif bant-seçici filtre olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Bu yapılar tasarlanırken, 5-6 farklı yapı üzerinden gidilmiş, simülasyon sonucunda en iyi geçirgenlik özelliği gösteren ve dar bantlı olan yapı olarak kuadkross filtre yapısı belirlenmiştir. Simülasyon sonuçları ve THz-TDS ölçümleri, kritik sıcaklık altında YBCO kuadkross filtre kullanılarak rezonansta belirgin bir spektral

ayarlanabilirliğin sağlanabileceğini göstermektedir. Düşük sıcaklık soğutma teknolojisi ile entegre olan, yüksek sıcaklık süperiletkenlerinden üretilecek THz metamalzeme filtreler, THz kaynaklarını & dedektörlerini oluşturmak ve geliştirmek için kullanılabilir.

Düşük sıcaklıktaki yüzey direnci ve kinetik indüktans, YBCO ince film kalınlığı azaldıkça artar; bu da, rezonans kuvvetinin biraz zayıflamasına ve rezonans frekansının daha yüksek frekanslara kaymasına neden olur. Daha önceki çalışmalarda daha ince YBCO filmlerden üretilen filtrelerin performanslarının daha iyi olduğu gösterilmiştir (Chen vd., 2010).. Bu sebeple tasarlanan Kuadkross filtre yapıları üretmek için 80 nm YBCO filmler kullanılmıştır.

Yukarıda da belirtildiği gibi süperiletken malzemelerin metal özellik göstermesi için düşük sıcaklıklara indirilmesi gerekmektedir. Literatüre göre YBCO malzemesi 86 ile 93 kelvin arası süperiletken özellik göstermektedir (Vendik vd., 1998). Soğutma işlemi zamana Terahertz Zamana Dayalı Spektroskopi sistemine entegre edilmiş kapalı devre Helyum kroyostat yardımıyla yapılmıştır. Kryostat sistemi pompa, kompresör ve soğukkafe olarak adlandırılan üç önemli sistemden oluşmaktadır. Şekil 83'de sistemin fotoğrafları mevcuttur. Kompresör iki boru yardımıyla soğuk kafaya bağlanmıştır. Kompresörden gönderilen soğutulmuş helyum gazı gaz giriş borusu yardımıyla soğuk kafaya yönlendirilir ve kafayı soğutur. Isınan helyum gazı ise gaz çıkış borusu ile soğuk kafadan tekrar kompresöre taşınır ve tekrar soğutulur. Soğuk kafa içerisinde bulunan bir piston yardımıyla yüksek ve düşük basınca sahip helyum gazının giriş ve çıkışı kontrol edilir. Örnekler soğuk kafanın ucunda bulunan örnek tutucusuna yerleştirilir ve yüksek kalite kuvars camlara sahip bir hazne ile kapatılır. Kuvars terahertz geçirgenliği oldukça yüksek bir malzemedir. Pompa yardımıyla soğuk kafa 1×10^{-3} torr basınca kadar düşürülür. Örnek tutucu, pompa ve kompresör sırasıyla Şekil 84'de gösterilmiştir. Süperiletken metamalzemelerin simülasyonu için CST MW studio programı kullanılmıştır. Süperiletken malzemelerin modellenmesinde literatürden yararlanılmıştır (Vendik vd., 1998). Süperiletken malzemenin sıcaklık ve frekansa bağlı modeli çıkarılmıştır. Model için gerekli olan karakteristik plazma frekansı, girim derinliği (penetration depth) gibi parametreler literatürden alınmıştır. Daha sonra örneğin kalınlığına göre yüzey empedans değeri hesaplanmıştır. Gerekli formüller denklem 1,2 ve 3' de görülmektedir.



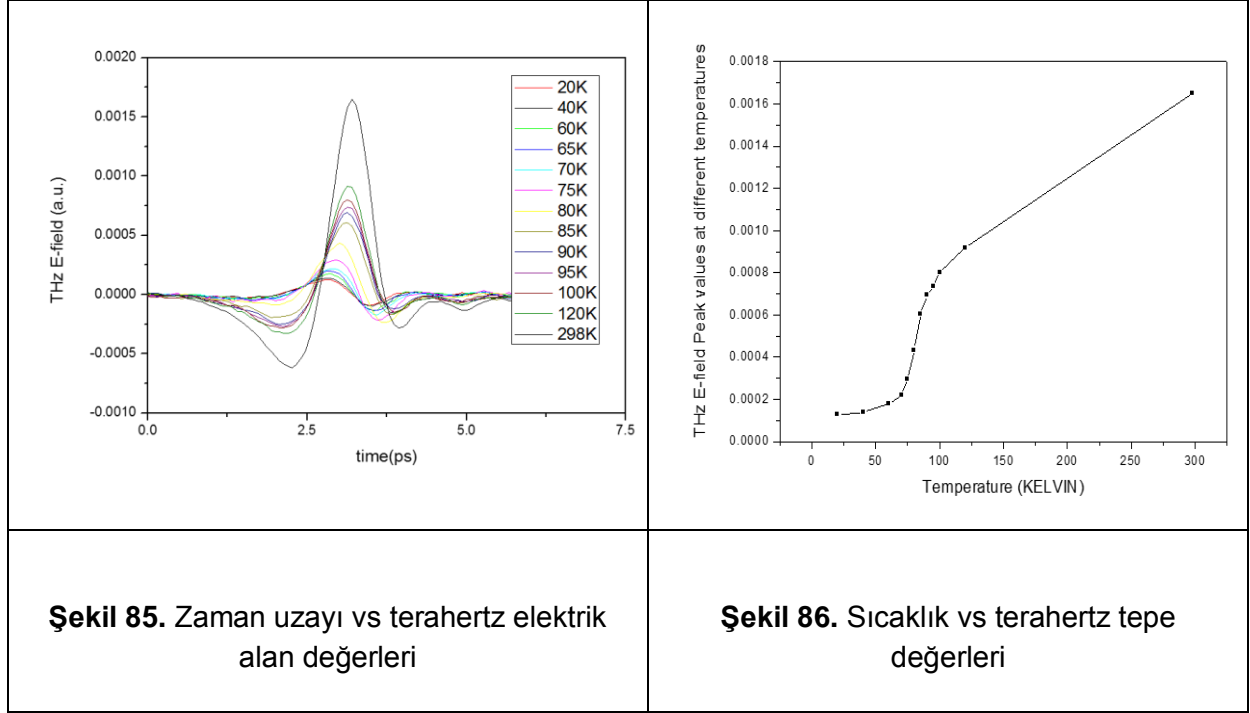
Şekil 83. Ölçümler esnasında kullanılan soğuk kafa.



Şekil 84. Örnek tutucu, kompresör ve pompa.

Örnek tutucu üzerinde bulunan bir yarıiletken sensör yardımıyla sıcaklık kontrolörü üzerinden sıcaklık değeri okunur. Kompresör çalışmaya başladığında sıcaklığı düşürür ve sıcaklık kontrolöründen akım gönderilerek dirençsel ısıtıcı yardımıyla sıcaklık artırılır, bu sayede sıcaklık kontrolü sağlanır.

Şekillendirilmemiş YBCO 500 μm safir üzerine büyütülmüş 80 nm YBCO süperiletkeni zamana dayalı THz spekrometresi ile 20, 40, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 120 ve 298 K sıcaklıklarında ölçülmüştür. Zaman uzayında olan ölçüm değerleri Şekil 85'de gösterilmiştir. Şekil 85 den THz tepe değerleri bulunup sıcaklığa karşı çizdirildiğinde Şekil 86 elde edilmektedir ki buradan kritik sıcaklık T_c bulunabilmektedir.



YBCO CST Simulasyon programında Two Fluid Model olarak isimlendirilen aşağıdaki denklemler kullanılarak modellenmiştir (Chen vd., 2010). Model normal yük taşıyıcılarının Drude denklemi ve süperiletken yük taşıyıcılarının London denklemi yardımıyla modellenmesinden oluşur. Model yardımıyla süperiletken malzemenin kompleks iletkenliği farklı sıcaklık ve frekanslar için hesaplanabilir. Kompleks iletkenliği hesaplanan süperiletken malzemenin kalınlığı kullanılarak yüzey empedansı hesaplanır daha sonra elde edilen değer simülasyon programında yüzey empedans metodu yardımıyla tanıtılır.

$$\sigma_{re} = \frac{ne^2}{m^*} \frac{f_n(T)\tau}{1 + w^2\tau^2} = \frac{ne^2\epsilon_0}{m^*\epsilon_0} \frac{f_n(T)\tau}{1 + w^2\tau^2} = w_p^2\epsilon_0 \frac{f_n(T)\tau}{1 + w^2\tau^2} \quad (2)$$

$$\sigma_{im} = \frac{ne^2}{m^*} \left[\frac{f_n(T)w\tau^2}{1 + w^2\tau^2} \frac{f_s(T)}{w} \right] = \frac{ne^2\epsilon_0}{m^*\epsilon_0} \left[\frac{f_n(T)w\tau^2}{1 + w^2\tau^2} \frac{f_s(T)}{w} \right] = w_p^2\epsilon_0 \left[\frac{f_n(T)w\tau^2}{1 + w^2\tau^2} \frac{f_s(T)}{w} \right] \quad (3)$$

$$f_n(T) + f_s(T) = 1 \quad (4)$$

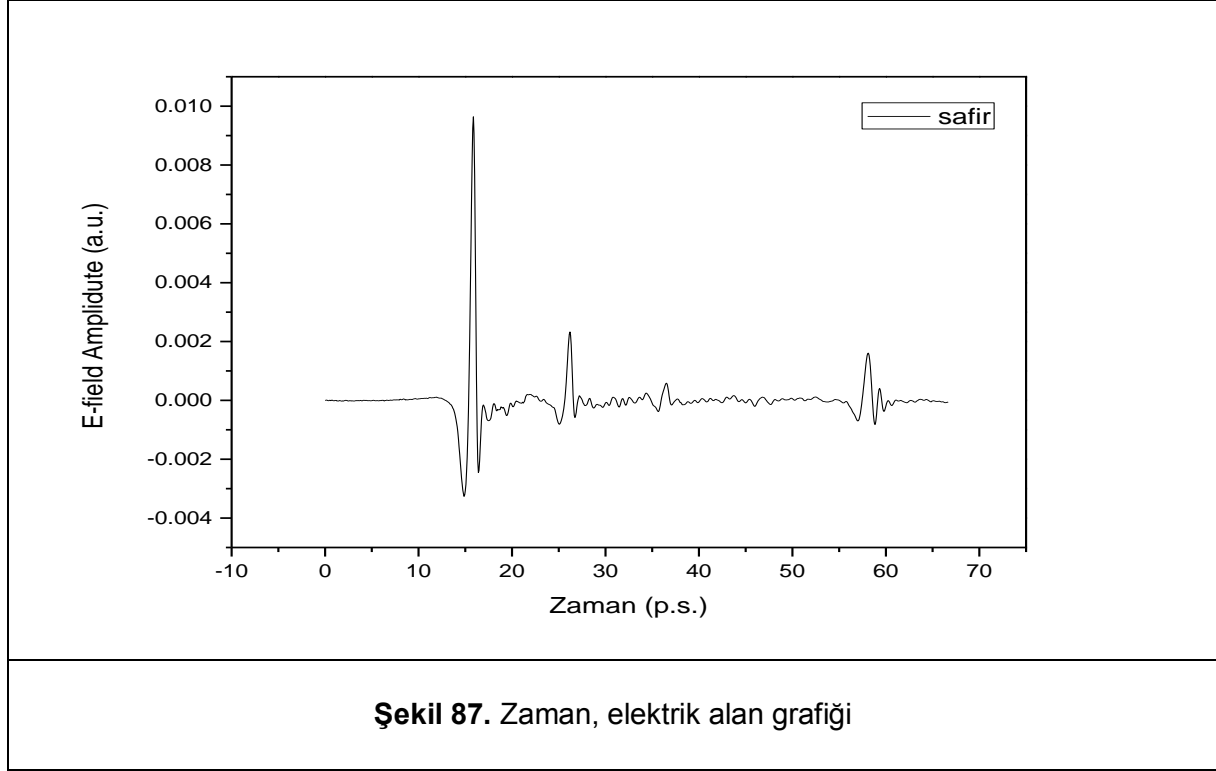
$$t = \frac{T}{T_c} \quad (5)$$

$$\frac{1}{\tau(t)} = \frac{1}{\tau(1)} \frac{t}{1 + \alpha(1^{1-\gamma} - t)} \quad (6)$$

$$\sigma = \sigma_{re} + i\sigma_{im} \quad (7)$$

$$Z_s = R_s + iX_s = \sqrt{\frac{iw\mu_0}{\sigma}} \coth(d\sqrt{iw\mu_0\sigma}) \quad (8)$$

YBCO malzemesi safir üzerinde olduğundan safirin THz bölgesinde kırıcılık indeksinin belirlenmesi THz-TDS yardımıyla yapılmıştır.



THz–TDS yardımıyla 500 μm kalınlığında olan safirin kırıcılık indeksinin 3.1 olduğu bulunmuştur (Şekil 87). Kırıcılık indeksi simülasyonlarda kullanılmıştır.

TDS yardımıyla elde edilen alttaşın kırıcılık indisi kullanılarak CST Microwave Studio programı yardımıyla simülasyonlar yapılmıştır. Süperiletken simülasyonları için öncelikle materyalin farklı sıcaklık ve frekanslarda iletken değerleri İki Akı Modeli (Two Fluid Model) yardımıyla hesaplanmıştır. Model Drude ve London teriminden oluşmaktadır. Drude terimi normal taşıyıcıların hareketini modellerken London terimi süperiletken taşıyıcıların hareketini modellemektedir. Model kritik sıcaklık olarak tanımlanan sıcaklık altında geçerlidir. Modele göre kritik sıcaklık üstünde süperiletken taşıyıcıların yoğunluğu artmaktadır fakat böyle bir durum mümkün değildir.

Simülasyon aşamasında denklemler 1-5 yardımıyla süperiletken malzemenin farklı sıcaklık ve frekanslarda kompleks iletkenliği hesaplanmıştır. Karakteristik parametreler literatürden alınmıştır (Brorsan vd., 1996; Vendik vd., 2001). Daha sonra süperiletken katmanın kalınlık

ve iletkenlik bilgileri kullanılarak istenilen frekans aralığı ve sıcaklıkta yüzey empedans değerleri hesaplanmıştır ve CST Microwave Studio programına tanıtılmıştır. Simülasyonlar CST Microwave Studio modülünün surface impedance table modeli kullanılarak yapılmıştır.

Süperiletken malzemenin iletkenliğinin yükselmesi için sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir. Malzemenin istenilen sıcaklığa erişmesi için son rapor'da şekil 83'de gösterilen soğutucu başlık kullanılmıştır. Başlığın uç kısmına optik ölçümlerin yapılabilmesi için kuartz camlar eklenmiştir. Bu iki kuartz cam, alttaş ve süperiletken tabakadan gelen yansımalara ek olarak süperiletken malzemenin düşük sıcaklıklarda metalik özelliğinin artmasından dolayı THz radyasyonun çok az geçirmesine ve süperiletken malzemenin optik iletkenliğinin terahertz bölgesinde belirlenememesine yol açmıştır. Mevcut simülasyon programlarında olduğu gibi CST programında da süperiletken malzemelerin özellikleri ile ilgili bir model yoktur. Dolayısıyla programa düşük sıcaklıklarda malzemenin iletkenliğini belirlemek için bir model kullanılmıştır. Literatürde karakterize edilmiş süperiletken malzemenin iletkenlik değerlerini fit etmek için two fluid model veya BCS modelleri kullanılmıştır (Pracht vd., 2012; Chen vd., 2010). BCS model genellikle metalik süperiletkenler için uygundur. Kuprate olarak adlandırılan süperiletkenler içinse raporda belirtilen two fluid model kabul görmektedir. Fluid model içinde malzemenin kalitesine ve sıcaklığına göre değişen parametrelere sahiptir. Raporda belirtilen iletkenlik denkleminde (denklem 2-3) plazma frekansı (ω_p) süperiletken taşıyıcı oranı ($f_s = 1 - (T/T_c)^Y$) ve normal iletken taşıyıcı oranı ($f_n = (T/T_c)^Y$) ve saçılma zamanı (τ) gibi değişkenler bulunmaktadır. Bu değişkenler ise kendi içinde başka parametrelere bağlıdır. Süperiletken ve normal iletken taşıyıcı oranını belirlemek için kullanılan Y değeri 1.3 ve 2.1 arasında değişiklik gösteren bir parametredir. Gorter Casimir bağlantısına göre bu kuvvet 4 olarak belirlenmiştir Tinkham (1995). Referans 4'e bakıldığında tablo 1' de olan bu değer 2.05, 1.68, 1.45, 2.08, 2.00 gibi değerler aldığı görülebiliyor. Bu değerler filmin kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Yüksek kaliteli filmlerde 2'ye kadar çıkabilirken düşük kaliteli filmlerde ise 1.5 civarlarında olabilmektedir (Vendik vd., 1998). Bu değer genel olarak HT_c süperiletkenlerde 2 olarak kabul edilir fakat literatürde bu kuvvetin 4 olarak alındığı çalışmalar mevcuttur (Shibata vd., 2001). Plazma frekansı ise yine literatürde oldukça farklı değerler alabilmektedir. Bu değer literatürde olan kaynaklarda 9500 , 25000 cm^{-1} değerlerin arasında değişiklik göstermektedir (Brorson vd., 1996; Frenkel vd., 1996; Schlesinger vd., 1981). Ayrıca bu zaman sabiti kendi içinde sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Zaman sabitinin formülü raporda denklem 6'da belirtilmiştir. Formül kendi içinde $\tau(1)$, α ve Y gama değerlerini barındırmaktadır. Saçılma zamanı sıcaklığa bağlı olarak değişen bir parametredir. Sıcaklık düştüğünde saçılma oranı $1/\tau$ da

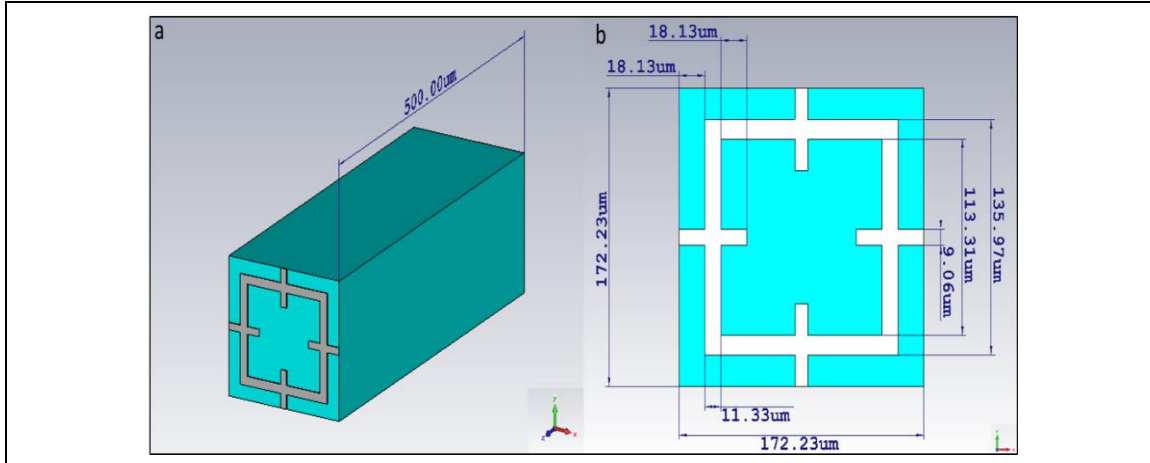
düşmektedir (Ludwig vd., 1996).. Relaxation time 10^{-13} ve 10^{-14} mertebeleri arasında değişebilmektedir(Frenkel vd., 1996).

Sonuç olarak süperiletken malzemenin düşük sıcaklıklarda iletkenliğinin bu kadar çok değişkene bağlı olması onu mevcut simulasyon programlarının kullanılarak simule edilmesini oldukça karmaşıktır. En yakın değeri verecek sonuç deneysel yolla elde edilmiş ve değerlerin fit edilerek doğruluğundan emin olunan değerlerdir. Fakat buna rağmen yapılan simulasyonlarda rezonans frekansının deneysel olarak elde edilen metayüzey rezonans frekanslarını oldukça yakın olduğu şekil 89 ve şekil 90' da görülebilir.

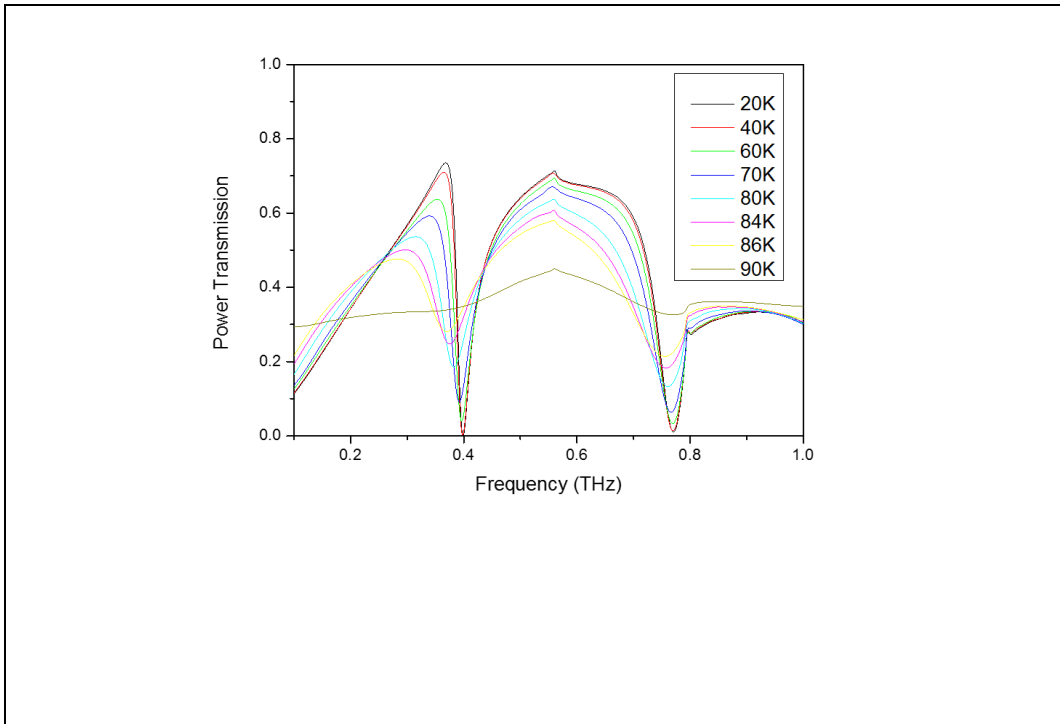
Altın malzeme ile yapılan deney sonucu ise yukarıda belirtildiği gibi düşük sıcaklıklara inmek için kullanılan soğutucu sistemin kuartz camlarından gelen etalon etkisidir. Bu etki temiz bir rezonans görmek için tasarlanan yapının geçirgenlik özelliklerini perdelemiştir. Deney ve simulasyonlarda rezonans noktalarında oluşan kaymalar ve geçirgenlik simulasyonda kullanılan ölçülerin üretim aşamasında meydana gelen küçük farklılıklardan meydana gelebilir.

9. YBCO KUADKROSS

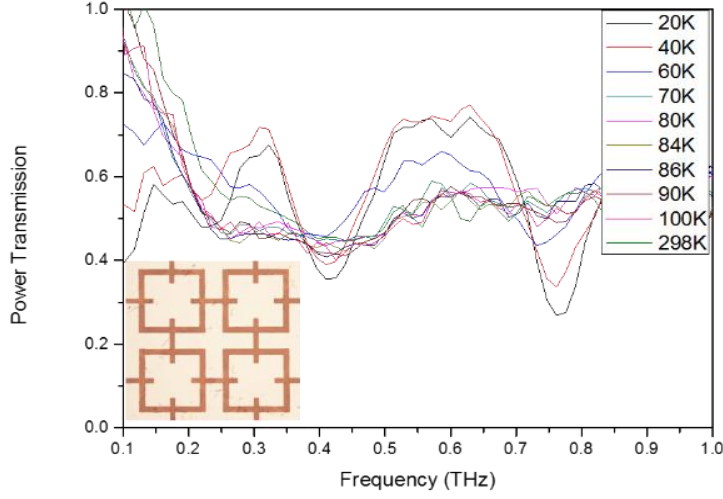
Süperiletken YBCO malzemesinin kuadkross olarak 500 μm kalınlığında safir üstüne şekillendirilmiş metamalzeme deneysel olarak kapalı devre helyum soğutmalı kriostatın THz-TDS sistemine entegre edilmesiyle karakterize edilmiştir. Süperiletken YBCO katman kalınlığı 80 nm olup metamalzeme yapısının birimkafes boyutları Şekil 88'da görülebilir. 20, 40, 60, 70, 80, 84, 86, 90, 100 ve 298 K gibi farklı sıcaklıklarda süperiletken metamalzemenin terahertz güç geçişi Şekil 89'de görülebilir.



Şekil 88. YBCO kuadkross yapısının boyutları



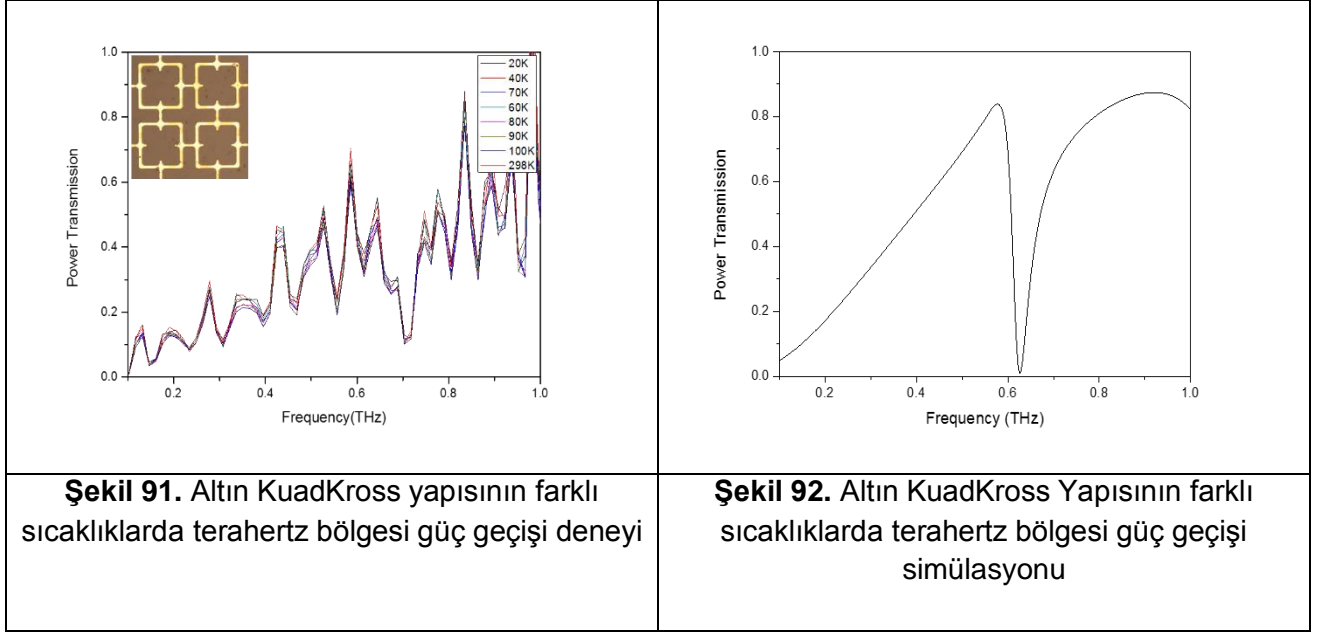
Şekil 89. YBCO kuadkross yapısının farklı sıcaklıklarda ve terahertz bölgesinde güç geçişi simülasyonu



Şekil 90. YBCO kuadkross yapısının farklı sıcaklıklarda ve terahertz bölgesinde güç geçişi deneyi

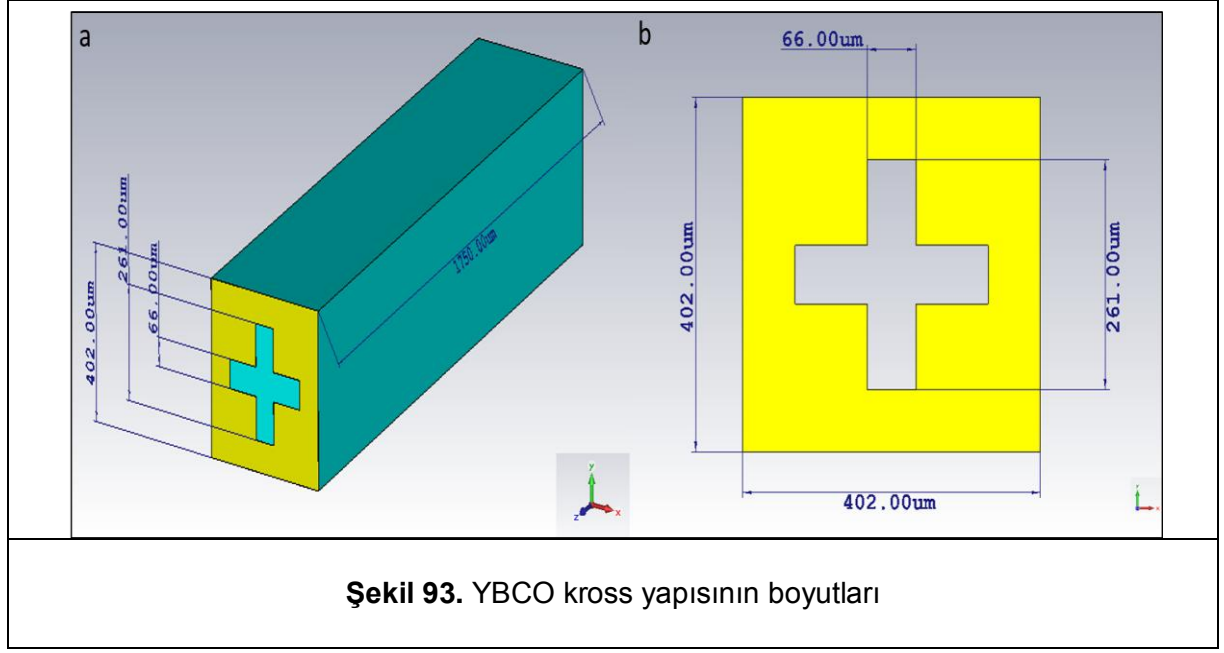
Bu metamateryale hem 0.412 THz'de hemde 0.765 THz'de 20 K'de rezonans göstermektedir. 40 K'da yapılan ölçümler sonucunda rezonansların sırasıyla 0.410 ve 0.760 THz'ye kaydığını göstermektedir. 60 K'da yapılan ölçümler rezonansların 0.390 ve 0.734 THz'ye kaydığını göstermektedir. Ayrıca Şekil 90'dan da görüldüğü gibi sıcaklığın artmasına bağlı olarak hem rezonanslar düşük frekanslara kaymış hemde güç geçişinin değiştiği gözlenmiştir. Şekillendirilmemiş süperiletkenin terahertz bölgesinde karakterizasyonu yapılmış olsa dahi sinyal seviyesinin çok düşük olması materyalin kompleks iletkenlik değerinin elde edilememesine yol açmıştır. Bu durum simülasyonların literatürden alınan bilgiler ışığında yapılmasına yol açmıştır. Literatürden plazma frekansı ve exponent terim gibi değerler belirlenmiş daha sonra istenilen frekans aralığı ve sıcaklık için kompleks iletkenlik değeri hesaplanmıştır. Elde edilen kompleks iletkenlik değeri ve süperiletken yüzeyin katman kalınlığı kullanılarak malzemenin frekans ve sıcaklığa bağlı olan yüzey empedans değeri hesaplanmış ve simülasyon programına tanıtılmıştır. Şekil 89 ve 90'da süperiletken metamateryalenin deney ve simülasyon sonucu görülebilir. Simülasyon değerlerinde görüldüğü üzere rezonans frekansları deneysel sonuçlarla oldukça yakın olmasına rağmen güç geçişi değerleri yakınlık göstermemektedir. Bu durumun nedeni olarak karakteristik parametrelerin literatürden alınması gösterilebilir. Ayrıca YBCO kuadkross metamateryalesi

ile aynı boyutlara ve şekle sahip altın metamalzeme farklı sıcaklıklarda terahertz bölgesinde karakterize edilmiştir. Bu yapıda alttaşı olarak fused silika kullanılmıştır. Alttaşın farklı olmasında dolayı rezonans simülasyon sonuçlarına göre 0.625 THz ye kaymıştır. Yapının deneysel ve simülasyon sonucu Şekil 91 ve 92'de görülebilir. Deneysel sonuçlardan görüleceği gibi etalon etkisi kaldırılamamıştır.

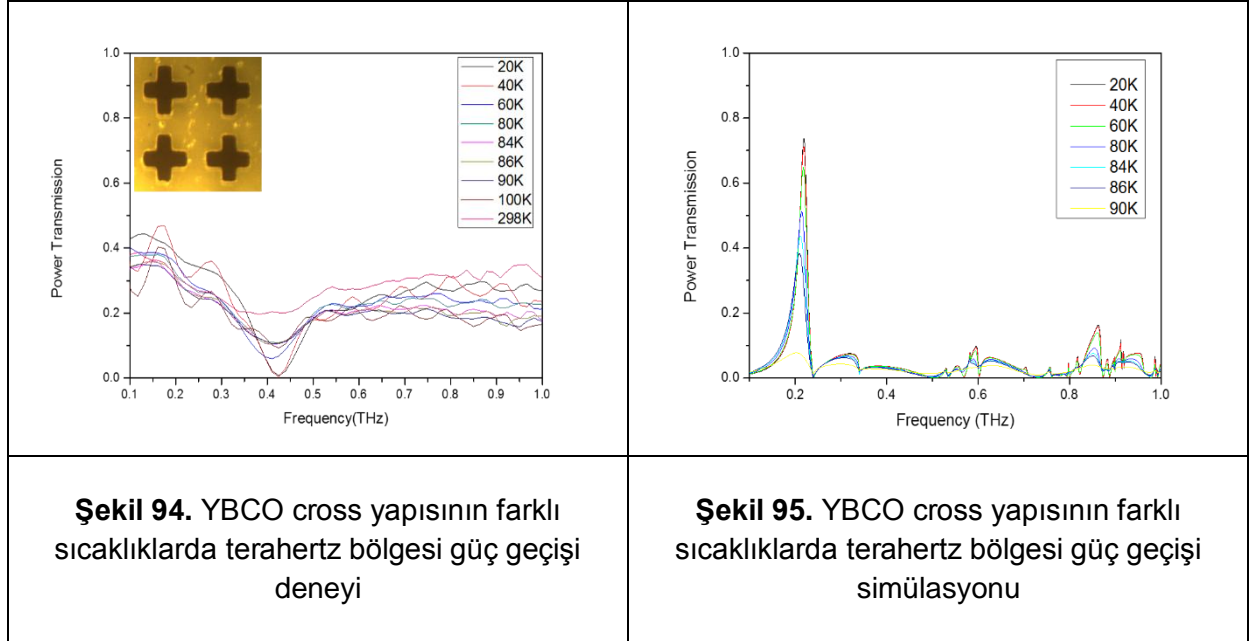


10. YBCO KROSS YAPISI

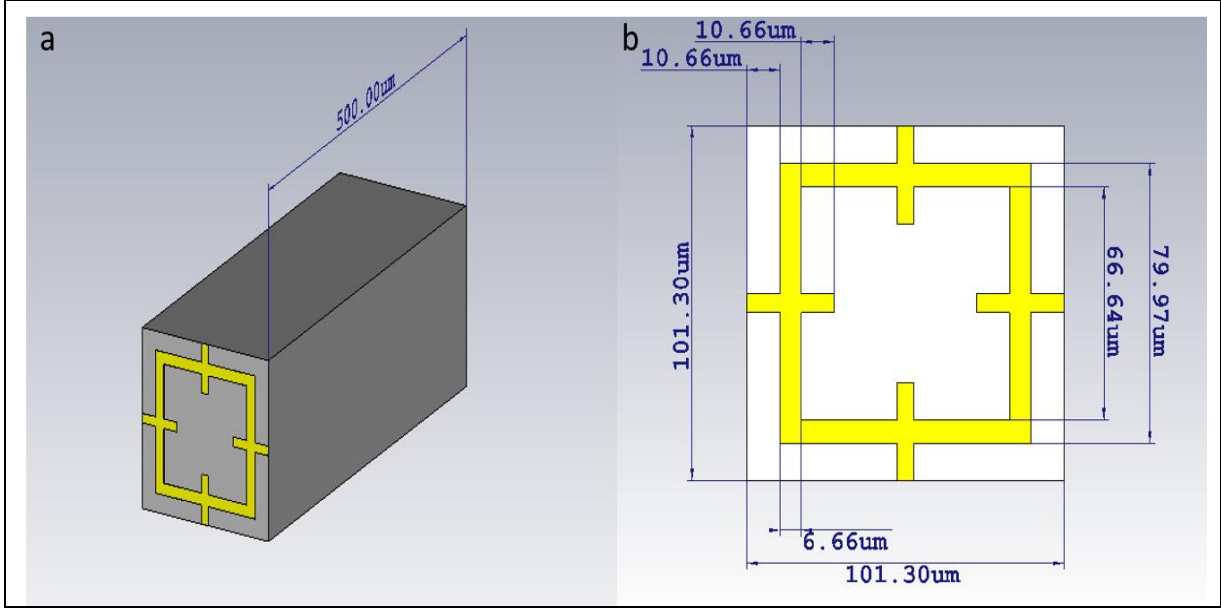
80 nm kalınlığındaki süperiletken YBCO malzemesi olarak kross şeklinde 500 μm kalınlığında safir üzerine büyütülmüştür ve metamalzeme olarak şekillendirilmiştir. Metamalzeme yapısının birimkafes boyutları aşağıdaki Şekil 93 görülebilir.



Metamalzeme farklı sıcaklıklarda terahertz bölgesinde karakterize edilmiştir. Simülasyonları literatürden alınan bilgiler yardımıyla yapılmıştır. Şekil 94 ve 95’de metamalzemenin deneysel karakterizasyon sonuçları görülebilir.

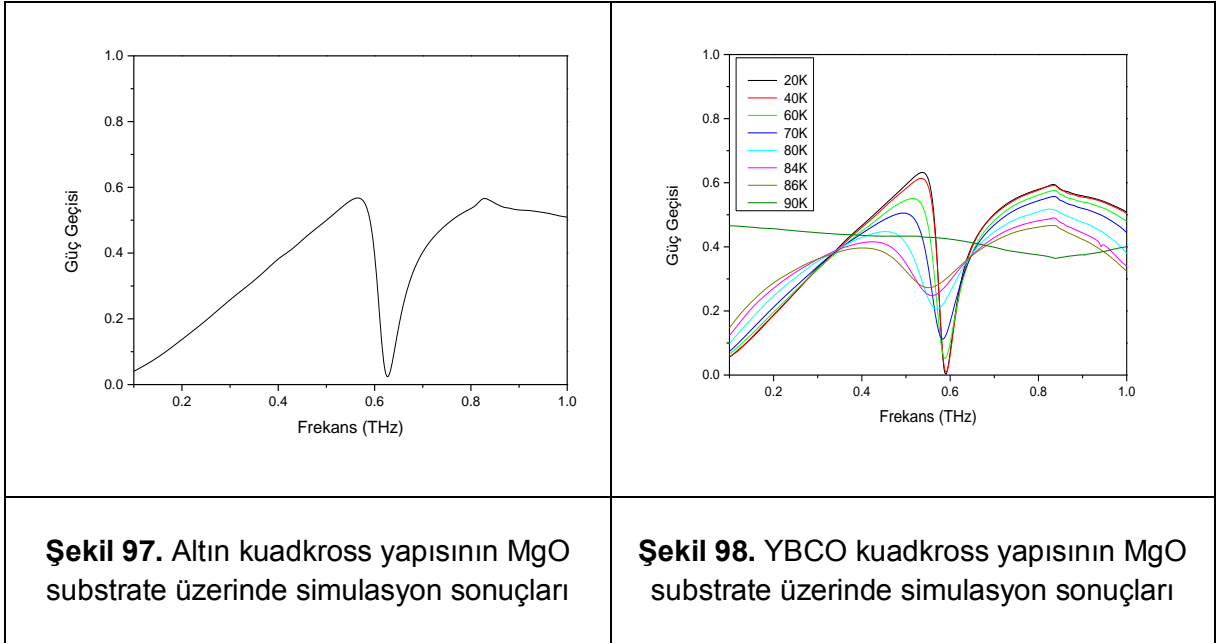


Bu sonuçlara ek olarak kuadkross yapısının altın ve YBCO iletkenleri kullanılarak fused silika, MgO ve LaAlO₃ alttaşları ile simülasyonları yapılmıştır (Şekil 96). Simülasyonlarda kullanılmak üzere MgO ve LaAlO₃ materyalinin dielektrik sabitleri sırasıyla 10.1 ve 24.9 olarak alınmıştır (Vendik vd., 2001; Kiwa vd., 2001).



Şekil 96. YBCO kuadkross yapısının MgO substrate üzerinde boyutları

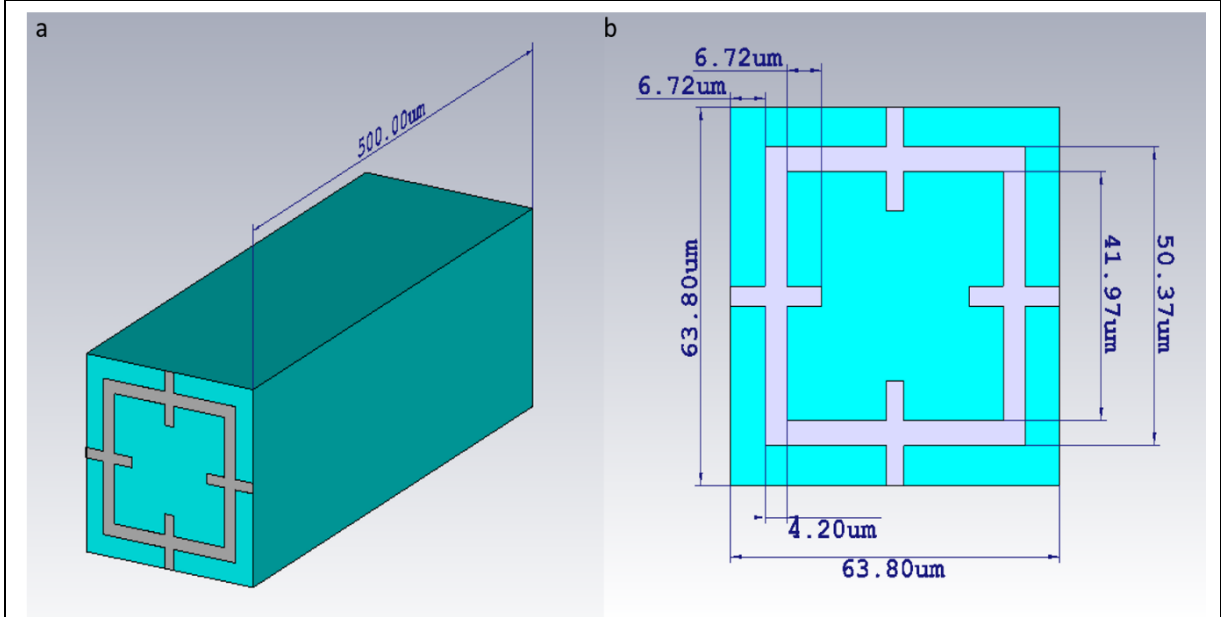
YBCO ve altın kuadkross yapısının MgO substrate üzerinde simülasyon sonuçları Şekil 97 ve 98 de görülebilir.



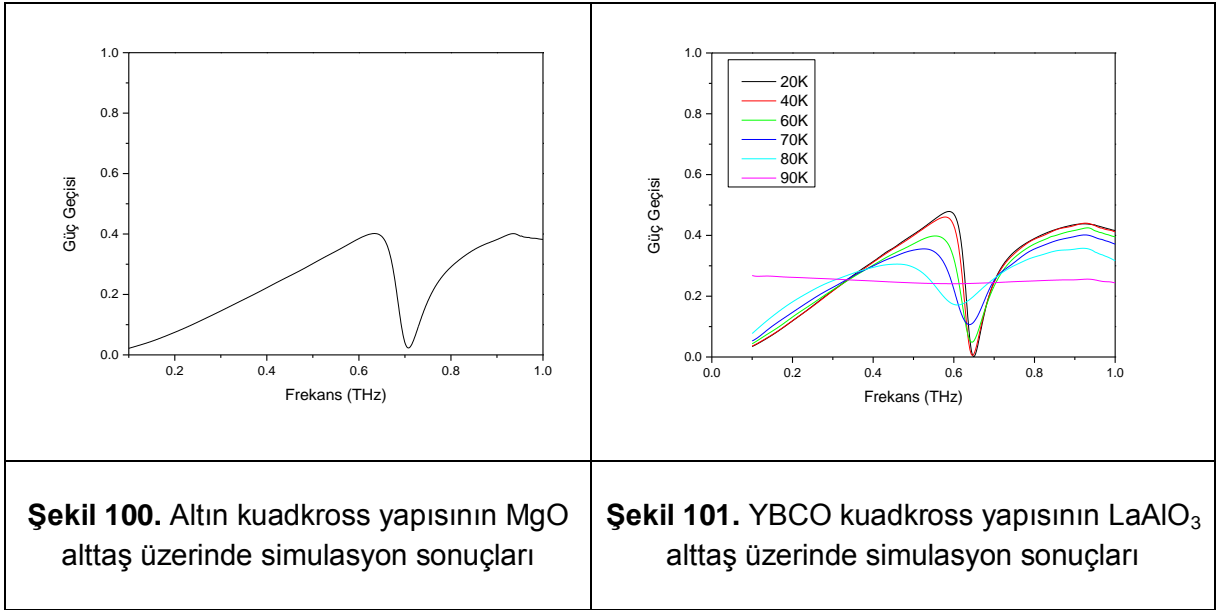
Şekil 97. Altın kuadkross yapısının MgO substrate üzerinde simülasyon sonuçları

Şekil 98. YBCO kuadkross yapısının MgO substrate üzerinde simülasyon sonuçları

Kuadkross yapısının altın ve YBCO iletkenleri kullanılarak LaAlO_3 alttaşları ile simülasyonlarında kullanılan boyutlar Şekil 99'da verilmiştir. YBCO ve altın kuadkross yapısının LaAlO_3 substrate üzerinde simülasyon sonuçları Şekil 100 ve 101 de görülebilir.



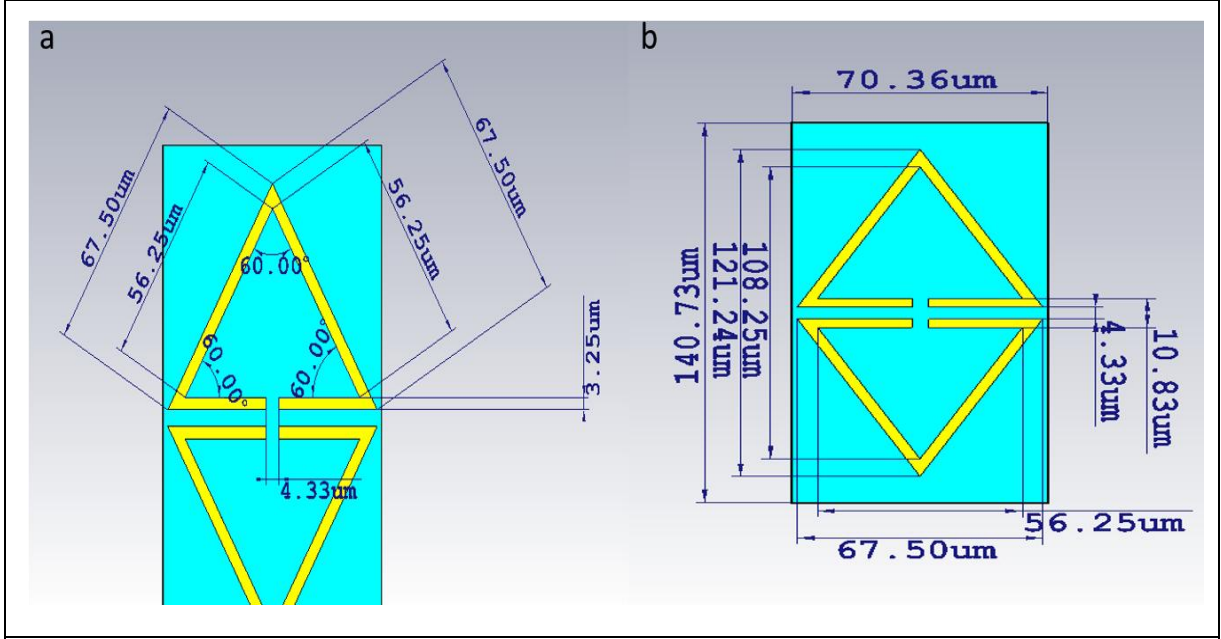
Şekil 97. YBCO kuadkross yapısının LaAlO₃ alttaşı üzerinde boyutları



Şekil 100. Altın kuadkross yapısının MgO alttaşı üzerinde simülasyon sonuçları

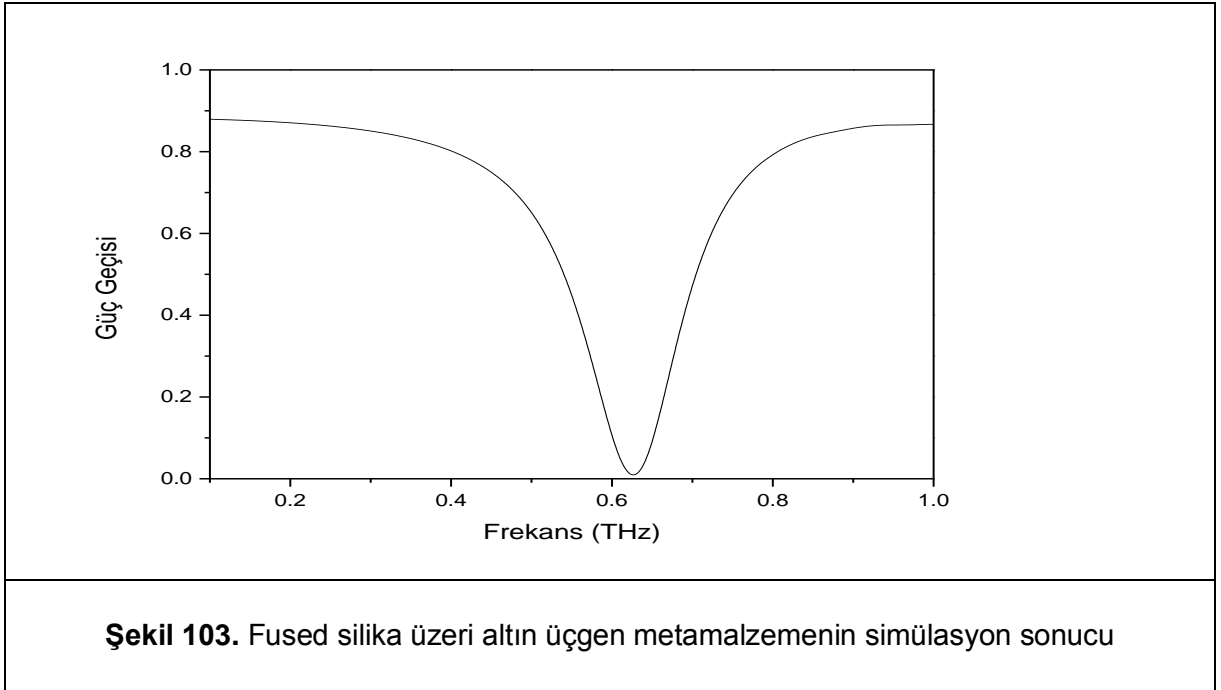
Şekil 101. YBCO kuadkross yapısının LaAlO₃ alttaşı üzerinde simülasyon sonuçları

Kross ve KuadKross yapısına ek olarak üçgen olarak dizayn edilmiş iletken yapıya sahip metamalzeme yapısında simüle edilmiştir. Yapının ilk olarak fused silika alttaşı için simüle edilmiştir. Fused silika alttaşı ve altın iletken malzeme ile yapı 625 THz'de rezonans göstermesi için belirlenen boyutlar aşağıda gösterildiği gibidir (Şekil 102).



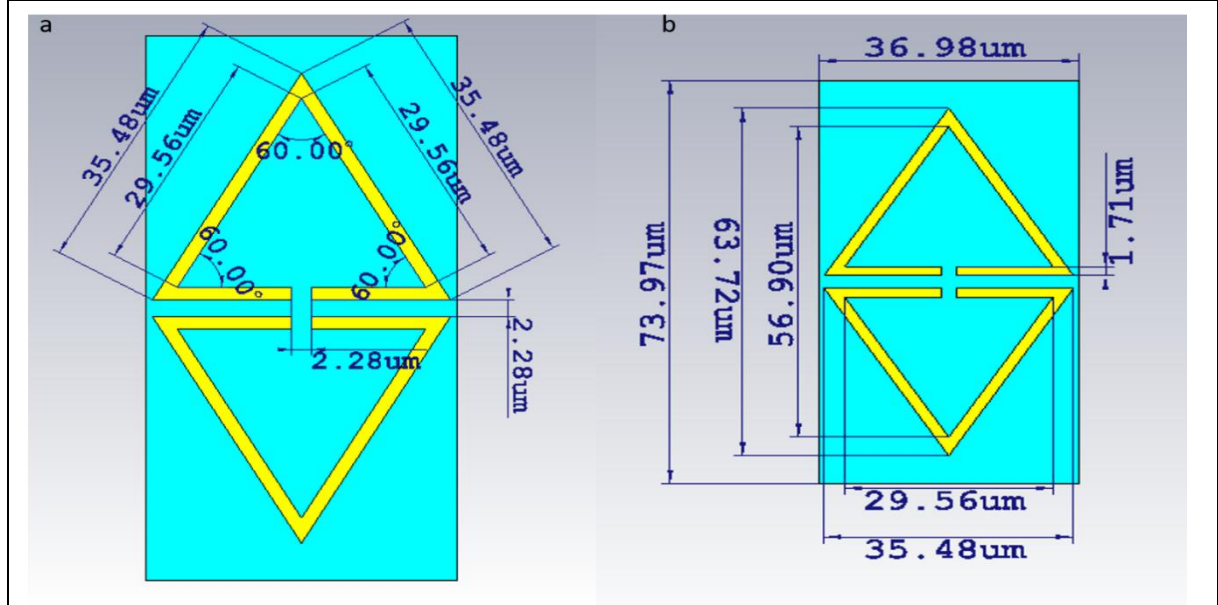
Şekil 102. Altın üçgen yapısının boyutları fused silika

Fused silika ve altın kullanılarak tasarılan metamalzemenin simülasyon sonucu Şekil 103'de verilmiştir.

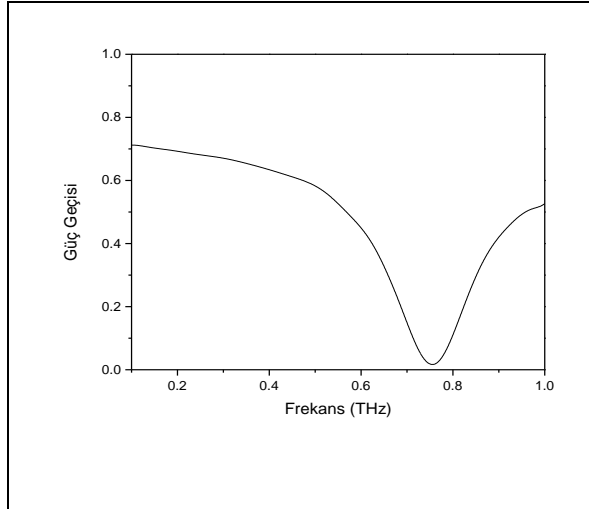


Şekil 103. Fused silika üzeri altın üçgen metamalzemenin simülasyon sonucu

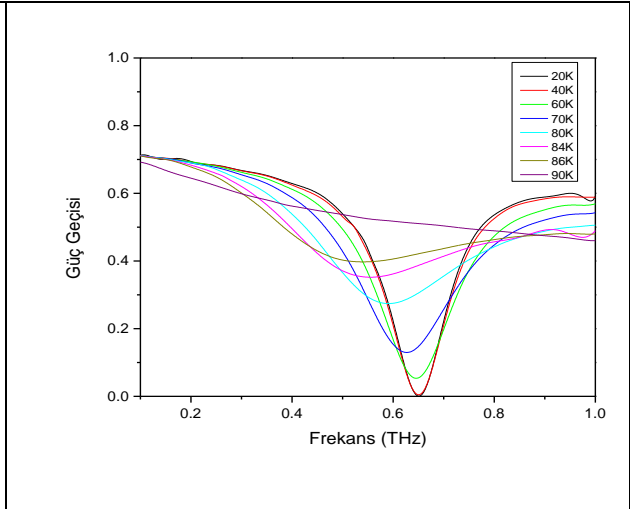
Üçgen metamalzemenin altın ve YBCO süperiletkeni ve MgO üzerinde dizaynı ve simülasyonuda yapılmıştır. Şekil 104'de gösterilen yapının MgO üzerinde altın ve YBCO yapısının boyutları ve simülasyon sonuçları Şekil 105,106'da görülebilir.



Şekil 104. Altın üçgen yapısının boyutları MgO

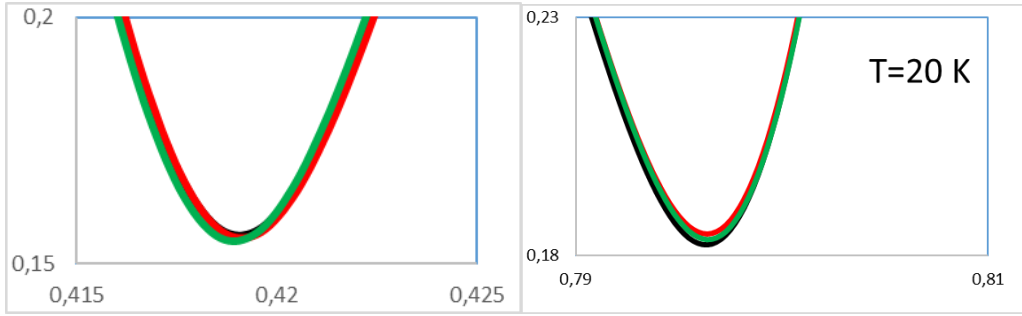
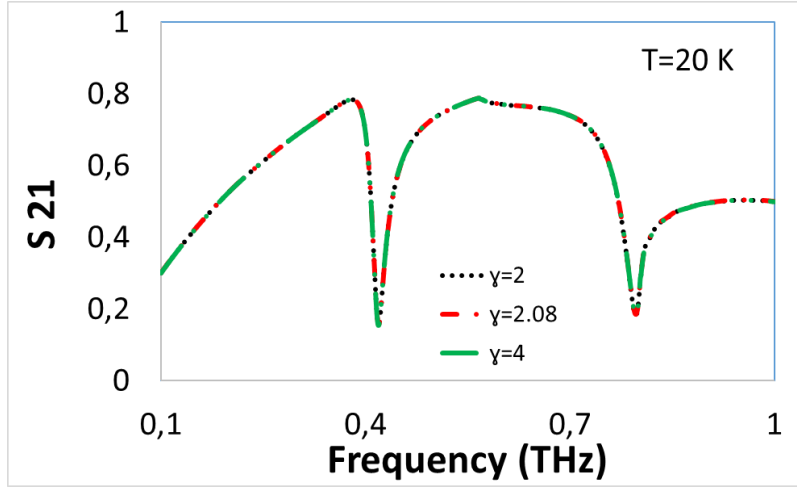


Şekil 105. Altın üçgen yapısının MgO üzerinde simülasyonu

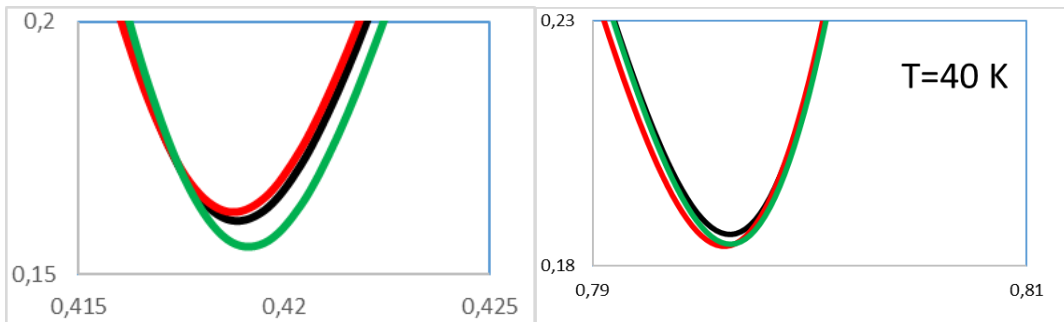
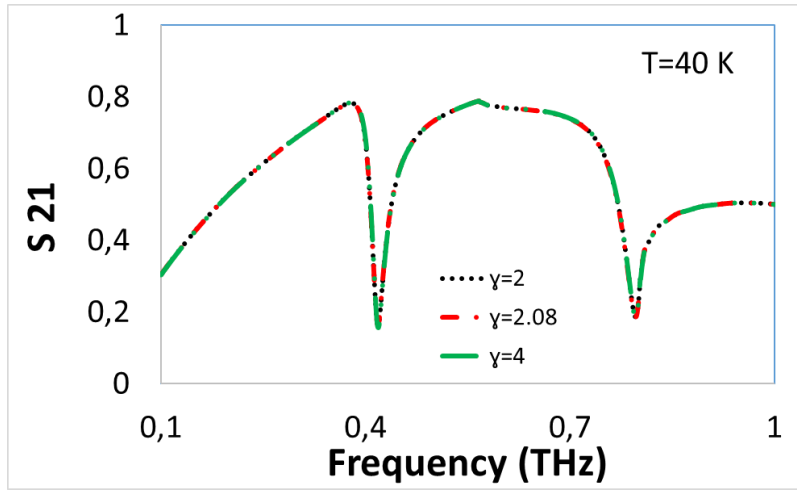


Şekil 106. YBCO üçgen yapısının MgO üzerinde farklı sıcaklıklarda simülasyonu

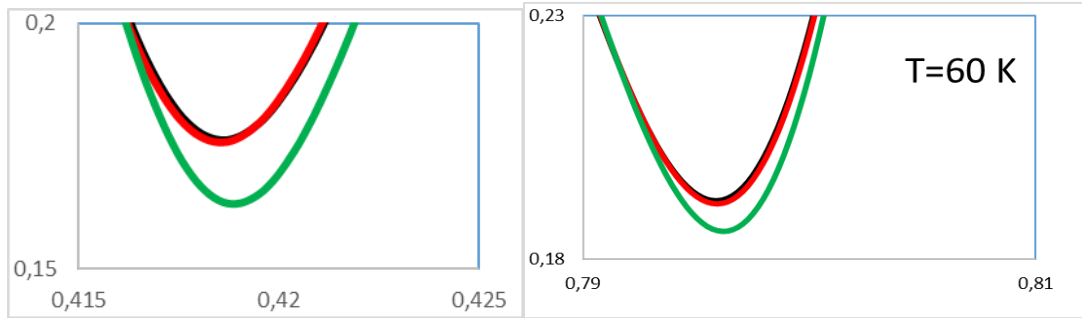
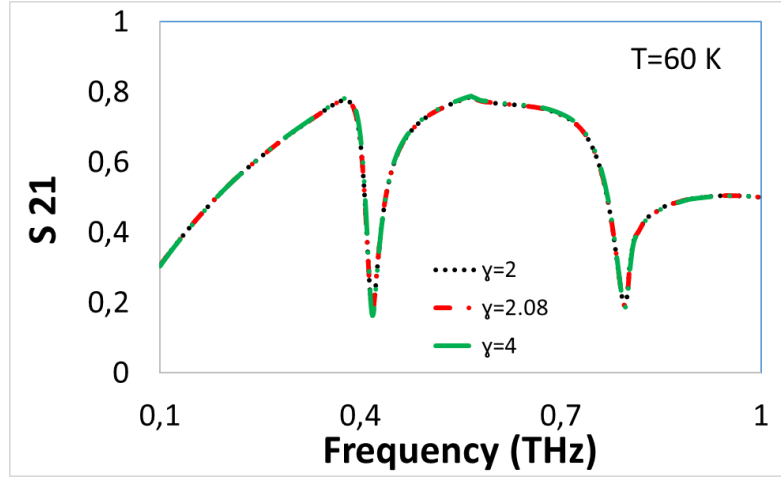
YBCO kuadkross yapısı için simülasyon sonuçları süperiletken ve normal iletken taşıyıcı oranını belirlemek için kullanılan γ değeri 2, 2.08 ve 4 alınarak 20, 40, 60, 70, 80 ve 84 K sıcaklıklarında tekrarlanmıştır. Filmin kalitesine bağlı değişebilen γ değeri değiştirilerek yapılan simülasyon sonuçlarıyla film kalitesinin rezonansa etkisi üzerine çalışılmıştır. Simülasyon sonuçları Şekil 107, 108, 109, 110, 111 ve 112'de görülmektedir. 20 K'de belirgin bir değişim gözlemlenemezken, 40, 60, 70 ve 84 K'de rezonansa kayma gözlemlenmiştir.



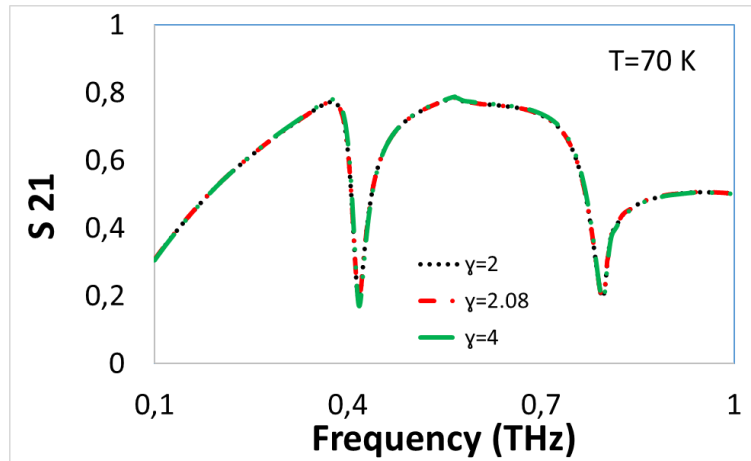
Şekil 107. YBCO kuadkross yapısının γ değeri 2, 2.08 ve 4 alınarak tekrarlanan 20 K'deki simülasyon sonucu.

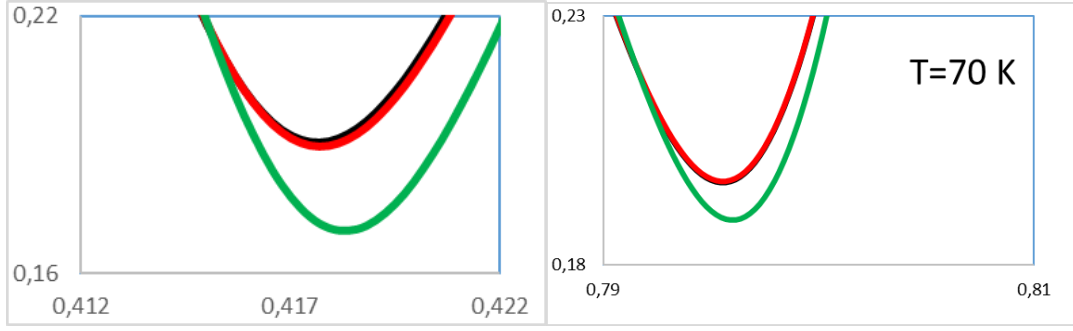


Şekil 108. YBCO kuadkross yapısının γ değeri 2, 2.08 ve 4 alınarak tekrarlanan 40 K'deki simülasyon sonucu.

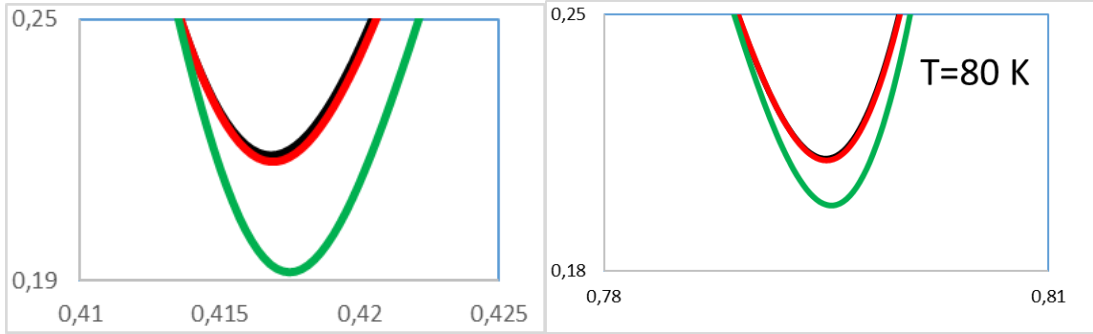
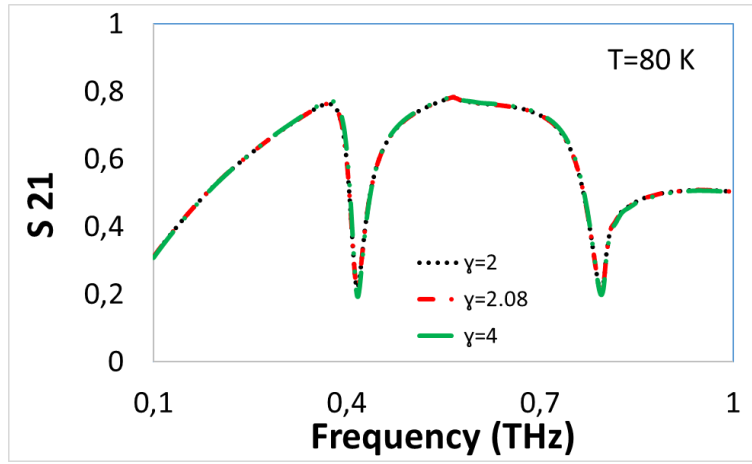


Şekil 109. YBCO kuadkross yapısının γ değeri 2, 2.08 ve 4 alınarak tekrarlanan 60 K'deki simülasyon sonucu.

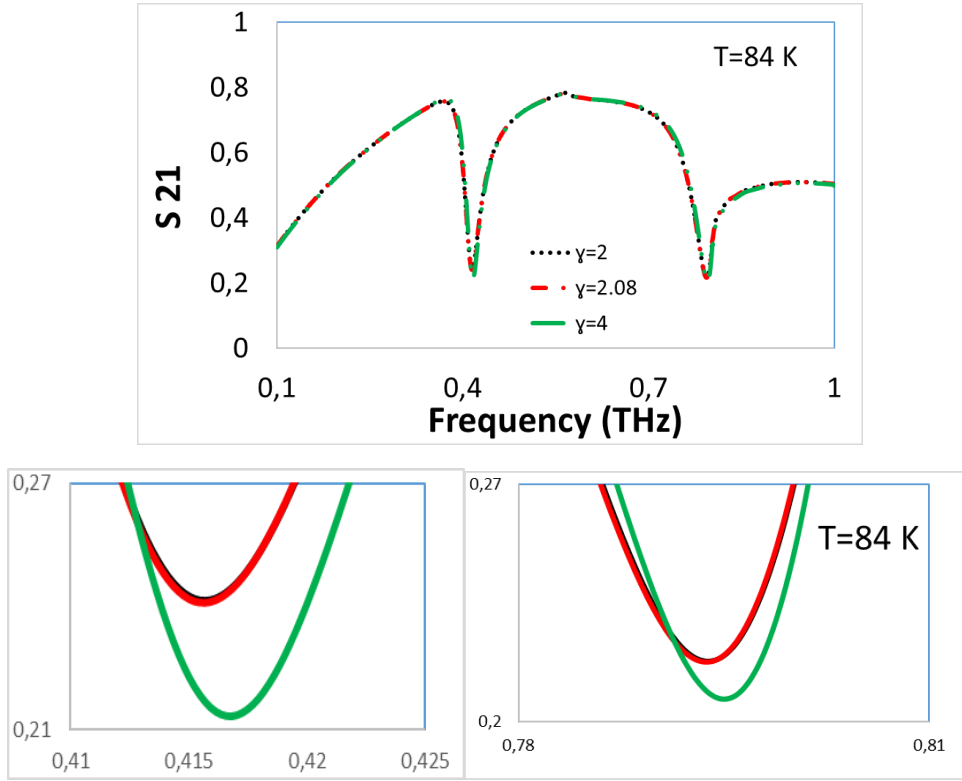




Şekil 110. YBCO kuadkross yapısının Y değeri 2, 2.08 ve 4 alınarak tekrarlanan 70 K'deki simülasyon sonucu.



Şekil 111. YBCO kuadkross yapısının Y değeri 2, 2.08 ve 4 alınarak tekrarlanan 80 K'deki simülasyon sonucu.



Şekil 112. YBCO kuadkross yapısının γ değeri 2, 2.08 ve 4 alınarak tekrarlanan 84 K'deki simülasyon sonucu.

11. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu proje'de, hem metal hem süperiletken metalmalzeme filtreler tasarlanmış, CST microwave studio programıyla nümerik analizleri yapılmış, FTIR ve Terahertz Zamana dayalı spektroskopisi kullanılarak terahertz bölgesinde karakterize edilmiştir. Fused silika ve safir alttaş üzerine Bakır, İndiyum kalay oksit, Titanyum, Altın ve yüksek sıcaklık süperiletkeni YBCO kaplı filmler kullanılarak uv-litografi ve e-beam litografi, iyon demeti aşındırma yöntemleriyle tasarlanan filtre yapıları şekillendirilmiştir.

Filtre üretimine artı tasarımlar ile başlanmıştır. Artı tasarımlı filtrelerin performansı periyodiklik G , çapraz uzunluk K , çapraz üye genişliği J ile belirlenmektedir. Bu filtrelerin band geçirme

özelliği özelliği G, K ve J elemanlarının boyutlarının değiştirilmesiyle değiştirilebilir. Bu çalışmada periyodik dizilerden oluşan Bakır (Cu), Titanyum (Ti) ve optik geçirgen İndiyum kalay oksit (ITO) metal-ağ filtreleri tasarlanmış ve fotolitografi tekniği kullanılarak THz geçiren fused silika alttaşlar üzerine üretilmiştir. ITO ince filmler düşük özdirence ve optik geçirgenliğe sahip olmalarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Cu, Ti ve ITO ince filmleri düşük vakum seviyesinde çalışan miknatıssal saçtırma sistemi ile kaplanmıştır. CST microwave studio programı ile tasarlanan filtreler Bruker Vertex V80 FTIR spektrometresi ve zamana bağlı THz spektropi sistemi ile karakterize edilmiştir. Band geçirgenlik ölçümlerinde tasarımlarla ve CST microwave simülasyonlarıyla uyumlu rezonans frekansı ve bant genişliği gözlemlenmiştir. Geçirgenlik ölçümlerinin kaplanan filmlerin iletkenliği ile bağıntısı üzerine çalışılmıştır. Beklenildiği gibi kullanılan ince filmlerin iletkenliği ile rezonans pikinin değeri artmıştır. Optik mikroskop görüntüleri deneysel veriler ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında örnek kalitesinin deneysel sonuçlara etkisi açıkça gözlemlenmiştir. Bu yapılar optik mikroskop görüntülerindeki kusurlar ve boyutlar ile tekrar simule edildiğinde deneysel sonuçlar ile birebir aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda optik geçirgen ITO filmlerinin THz filtre uygulamalarında kullanılabileceği anlaşılmıştır. Sadece istenen frekansta elektromanyetik dalgaları geçiren, optik geçirgen ITO üzerine tasarlanan filtreler, binalarda pencere camlarına entegre edilerek elektromanyetik dalga kalkanlama amaçlı kullanılabilecektir. Bu çalışma Quantum Electronics dergisinde 2016 yılında yayımlanmıştır.

Artı yapılarına ek olarak kuadkross ismini verdiğimiz yeni ve özgün bir filtre yapısı istenilen frekansta çalışacak şekilde tasarlanıp simule edilmiştir. Bu yapı öncelikle altın ince film üzerinde e-demeti litografisi tekniği ile şekillendirilmiş ve THz spektropi sistemi ile karakterize edilmiştir. Nümerik sonuçlar ile uyumlu olarak 0.92 THz'de rezonans gözlemlenmiştir. Bu çalışmalar ile eş zamanlı dc ve rf miknatıssal saçtırma sistemlerinde kendi hazırladığımız ve satın aldığımız BSCCO hedef ile ince film büyütme çalışmalarına başlanmıştır. Büyütülen filmlerin yapısal ve elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır. Elementel analiz sonucunda Bi₂212 fazı elde edildiği ve 300-20 K aralığında yapılan direnç-sıcaklık ölçümlerinde filmlerin süperiletken olduğu bulunmuş ve 2212 fazına özgü 80-90 K arasında süperiletken hale geçiş gözlemlenmiştir. Fakat süperiletken geçiş sırasında sıfır direnç gözlemlenememiştir. Bunun sebebi süperiletken malzemenin tek fazda olmayışdır ve XRD analiz sonucunda elde edilen 2201 ve 2223 fazına ait pikler bu sonucu doğrular niteliktedir. Bu yüzden proje önerisinde belirtilen B planına geçilmiştir ve BSCCO filmler ekran baskı yöntemi ile safir üzerinde büyütülmeye çalışılmıştır. Bu yöntem ile tek fazda film üretilmiştir fakat filmler 4-5 mikrometre kalınlığında olduğundan bu filmler ile filtre üretimi yapılamamıştır. Çünkü bu kalınlıkta bir filmi iyon demeti aşındırma sistemi tamamen aşındıramamıştır ve fotorezist uzun aşındırma

sürecine dayanamamıştır. Halihazırda BSCCO film üretimi için farklı yöntemler denenmeye ve bu konu üzerinde çalışmaya devam edilmektedir.

BSCCO için öngörülen metamalzeme filtre yapısına alternatif olarak yurtdışından YBCO ince film temin edilmiştir. 80 nm kalınlığında safir üzerine büyütülmüş YBCO ince filmler ile kuadkross filtre simülasyonu ve üretimi yapılmıştır. Üretim öncesinde filtre haline getirilmemiş YBCO filmlerin geçirgenlik ölçümleri kapalı devre He kroyostat entegre edilen THz-TDS sistemi ile 300-20 K sıcaklık aralığında yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre oda sıcaklığında daha yüksek geçirgenlik gösteren YBCO film, sıcaklık 20 K'e düşürüldüğünde daha düşük geçirgenlik gözlemlenmiştir. Bu süperiletken örneğin kritik sıcaklık altına inildiğinde Cooper çiftlerinin oluşması, iletkenliğinin artması ve terahertz radyasyonunu bloke etmesiyle ilişkilidir. Bu ölçümlerden, farklı sıcaklıklardaki E-alan pik değerleri grafik üzerinde çizdirilmiş ve örneğin kritik sıcaklığının 90-95 K arasında olduğu bulunmuştur. Daha sonra YBCO ince film simülasyon sonuçları ile belirlenen ölçülerde e-demeti litografisi ile şekillendirilmiştir. YBCO kuadkross filtrenin geçirgenlik ölçümleri yine kapalı devre He kroyostat entegre edilen THz-TDS sistemi ile 300-20 K sıcaklık aralığında yapılmıştır. Ölçümlere göre 20 ve 40 K 'de filtre 0.412 THz and 0.765 THz frekanslarında 2 keskin rezonans göstermiştir. Bu ölçümlerde sıcaklık kritik sıcaklığın altına inildiğinde ve daha düşük sıcaklıklara gidildiğinde hem rezonans kayması hem de genlikte değişim gözlemlenmektedir. Simulasyon sonuçlarında kullanılan süperiletken malzemenin kompleks iletkenliği deneysel olarak bulunamayıp, raporda belirtilen denklemler ile hesaplanmıştır. Plazma frekansı ve nüfuz derinliği gibi malzemeye özgü parametreler de literatürden alınmıştır. Süperiletken YBCO kuadkross filtrelerin deneysel geçirgenlik ölçümlerinin simülasyon sonuçlarıyla uyumlu olduğu ve rezonans frekansının sıcaklıkla kaydığı bulunmuştur. YBCO kuadkross filtreler ile karşılaştırabilmek için ince film altından üretilen kuadkross filtrelerin de kapalı devre He kroyostat entegre edilen THz-TDS sistemi ile 300 K-20 K sıcaklık aralığında ölçümleri alınmıştır. Rezonans veya genlikte bir değişim gözlemlenmemiştir ve kuvvetli etalon etkisi gözlemlenmiştir. Kısaca süperiletken metamalzemeler ile sıcaklık yardımıyla rezonans frekansı ayarlanabilirken, metal filtreler bunu sağlayamamıştır.

Süperiletken filmlerin kullanımı metamalzemelerdeki kayıpları azaltmanın yollarından biridir, ancak kullanılan YBCO filminin kalitesi; doping ve büyüme koşullarına, kompozisyona, proses optimizasyonuna ve alttaşa büyük ölçüde bağlıdır. Süperiletken malzemelerin kusurları, örgüdeki çatlaklar, boşluklar veya akım akışını nispeten engelleyen ikincil fazlar, çoğunlukla YBCO' daki kritik akım yoğunluğunu sınırlar. Yan tanecikler arasındaki artan yanlış yönlendirme açısı, akım akışına sınırlama getiren başka bir faktördür. Bu kusurlar simülasyonlar yapılırken hesaba katılmadığı için deneysel sonuçlar ve nümerik sonuçlar arasında farklılığa ve kayıplara yol açmaktadır. Projede özgün olarak tasarlanan kuadkross metamalzeme filtre yapısı için patent alınacaktır.

Terahertz teknolojisi iletişim, görüntüleme, spektroskopi ve güvenlik gibi birçok uygulama alanında önemli bir yere sahiptir. Bu bağlamda, Terahertz frekans aralığında çalışan, ek elemanlara ihtiyaç duyulmadan ayarlanabilir ve kayıpsız metamalzeme filtre üretebilmek uygulama alanları için önem arz etmektedir. Deneysel ve nümerik sonuçlar ile doğruladığımız gibi ITO, bakır ve altın ince filminden üretilen ve keskin rezonans gözlemlenen metamalzeme filtreler gelecek kablosuz THz iletişim uygulamaları için umut vericidir (330 ve 900 GHz için). YBCO gibi sıcaklık ile kolaylıkla kontrol edilebilen kompleks iletkenliğe sahip yüksek sıcaklık süperiletkenleri ile ayarlanabilir, düşük kayıplı THz aygıtlarının üretimi yapılabilir. Özellikle düşük maliyetli soğutma teknolojisi kullanılarak ölçüm alındığında YBCO yüksek sıcaklık süperiletkeninden ürettiğimiz THz metamalzeme filtreler THz kaynakları ve dedektörlerinin yapımı ve geliştirilmesi için de kullanılabilir.

Tamamlanan bu proje, THz gibi güncel bir konuda aygıt geliştirme yanısıra proje ekibinde yer alan terahertz konusunda birbirini tamamlayan İYTE, ODTÜ ve ODTÜ Kıbrıs üniversitelerinin çalışma gruplarının birlikte çalışmalarına; yeni fikirlerini, araştırma bulgularını ve deneyimlerini paylaşmalarına olanak tanımıştır. Her üç grup da özgün Terahertz alanında, fabrikasyon, ölçüm ve modelleme konularında uzun süreli deneyime sahiptir. Projenin başarı ile sonuçlanması neticesinde, 3 yurtdışı yayın hazırlanmış bir tanesi halihazırda kabul almış ve 8 bildiri yayımlanmıştır. Ayrıca, disiplinlerarası ve Avrupa işbirliği ile bir tanesi Kanada, biri COST action ve biri ASEL SAN olmak üzere 3 yeni proje daha hazırlanmıştır. Avrupa Çerçeve programına daha büyük projeler hazırlamak üzere çalışılmaktadır.

Kaynaklar

Auge, J., Rudiger, U., Frank, H., Roskos, H.G., Guntherodt G., Kurz, H. 1994. "Oxygen control of dc-sputtered Bi₂212 films", Applied Physics, 64-3, 378-381.

Baker, A. P., Glowacki, B. A. 1994. "The dependence of Bi₉Sr₁₁Ca₅ oxide on the stoichiometry of Bi-2212 and its reversible phase transition in oxidising and non-oxidising and its reversible phase transition in oxidising and non-oxidising annealing conditions", Physica C 223, 383.

Brorson, S. D. et al., 1996. "Electrodynamics of high-temperature superconductors investigated with coherent terahertz pulse spectroscopy", J. Opt. Soc. Am. B, 13, 9, 1979.

Chen, H. T., O'Hara, J. F., Azad, A. K., Taylor, A. J., Averitt, R. D., Shrekenhamer, D., Padilla, W.

- J. 2008. "Experimental demonstration of frequency agile terahertz metamaterials", *Nat. Photonics*, 2, 5, 295–298.
- Chen, H. T., Padilla, W. J., Zide, J. M. O., Gossard, A. C., Taylor, A. J., Averitt, R. D. 2006. "Active terahertz metamaterial devices", *Nature*, 444, 597-600.
- Chen, H. T., Yang, H., Singh, R., O'Hara, J. F., Azad, A. K., Trugman, S. A., Jia, Q. X., Taylor, A. J. 2010. "Tuning the resonance in high-temperature superconducting terahertz metamaterials", *Phys. Rev. Lett.*, 105, 247402.
- Cren, T., Roditchev, D., Sacks, W., Klein, J., Moussy, J.B., Cavellin, C.D., Lagues, M. 2000."Influence of disorder on the local density of states in high-T, superconducting films", *Physical Review Letters*, 84, 147-150.
- Demirhan, Y., Alaboz, H., Ozyuzer,, L., Nebioglu, M. A., Takan, T., Altan, H., Sabah, C. 2016. "Metal mesh filters based on Ti, ITO and Cu thin films for terahertz waves", *Opt Quant Electron*, 48, 170.
- Demirhan, Y., Saglam, H., Turkoglu, F., Alaboz, H., Ozyuzer, L., Miyakawa, N., Kadowaki, K. 2015. "Area dependence and influence of crystal inhomogeneity on superconducting properties of Bi2212 mesa structures", *Vacuum*, 120, 89-94.
- Ebbesen, T. W., Lezec, H. J., Ghaemi, H. F., Thio, T., Wolff, P. A. 1998. "Extraordinary optical transmission through subwavelength hole arrays", *Nature*, 391, 667-669.
- Endo, K., Yamazaki, H., Misawa, S., Yoshida, S., Kajimura, K. 1992."High-quality superconducting thin films of Bi2Sr2Ca2Cu3Ox grown in situ by metalorganic CVD", *Nature*, 355, 327.
- Falcone, F., Lopetegi, T., Baena, J. D., Marqués, R., Martín, F., Sorolla,, M. 2004. "Effective negative- ϵ stop-band microstrip lines based on complementary split ring resonators," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 14, 280-282.
- Frenkel, A. et al., 1996. "Conductivity peak, relaxation dynamics, and superconducting gap of YBa2Cu3O7 studied by terahertz and femtosecond optical spectroscopies", *Phys. Rev. B*, 54, 2, 1355–1365.
- Glossner A., Zhang C., Kikuta S., Kawayama I., Murakami H., Müller P., and Tonouchi M. 2012. "Cooper Pair Breakup in YBCO under Strong Terahertz Fields", *Arxiv Prepr. arXiv*, 3, 4.
- Hand, T. H., Cummer, S. A. 2008. "Frequency tunable electromagnetic metamaterial using ferroelectric loaded split rings", *J. Appl. Phys.*, 103, 066105.
- Hsieh F.J., Wang W.C. 2012."Full extraction methods to retrieve effective refractive index and parameters of a bianisotropic metamaterial based on material dispersion model", *J. App.Phy.*, 112, 064907.
- Kawase, K. 2004. "Terahertz imaging for drug detection and large-scale integrated circuit inspection", *Opt. Photonics News*, 15, 34-39.
- Kim, S. S., Moon, J. H., Lee, B. T., Hishita, S. 2002. "Recrystallization of ion-beam amorphized Bi2Sr2Ca1Cu2Ox thin films on SrTiO3(001)", *Thin Solid Films*, 415, 224-227.
- Kimand, D. H., Choi, J. I. 2006. "Design of a multiband frequency selective surface", *ETRI Journal* 28;4, 506–508.

- Kleine-Ostmann, T., Nagatsuma T. 2011. "A review on terahertz communications research. J Infrared Millim Te Waves", 32,143–171.
- Koseoglu, H., Turkoglu, F., Demirhan, Y., Ozyüzer, L. 2011. "The Fabrication of THz Emitting Mesas by Reactive Ion-Beam Etching of Superconducting Bi2212 with Multilayer Masks", J. Supercond. Nov. Magn. 24, 1083.
- Koseoglu, H., Turkoglu, F., Kurt, M., Yaman, M. D., Akca, F., Aygun, G., Ozyuzer, L. 2015. "Improvement of optical and electrical properties of ITO thin films by electro-annealing", Vacuum, 120, 8-13.
- Kurter, C et al., 2012. "Switching nonlinearity in a superconductor-enhanced metamaterial", Applied Physics Letters, 100, 121906.
- Levinson, M., Shah, S., Naito, N.1988. "Superconducting Bi-Sr-Ca-Cu-O films by magnetron sputtering of single Bi2O3-SrF2-CaF2-CuO targets", Appl. Phys. Lett. 53, 922.
- Linden, S., Enkrich, C., Wegener, M., Zhou, J., Koschny, T., Soukoulis, C. M. 2004. "Magnetic Response of Metamaterials at 100 Terahertz", Science, 306, 1351–1353.
- Ludwig, C., Jiang, Q., Kuhl, J., and Zegenhagen, J. S., 1996. "Electrodynamic properties of oxygen reduced YBa2Cu3O7-x thin films in the THz frequency regime" Phys. C, 269, 249–254.
- Martin-Moreno, L., Garcia-Vidal, F. J., Lezec, H. J., Pellerin, K. M., Thio, T., Pendry, J. B., Ebbesen, T. W.2001. "Theory of Extraordinary Optical Transmission through Subwavelength Hole Arrays", Phys. Rev. Lett. 86;6, 1114-1117.
- Melo, A. M., Kornberg, M. A., Kaufmann, P. vd. 2008. "Metal mesh resonant filters for terahertz frequencies", Applied Optics, 47;32, 6064–6069.
- Michael Tinkham "Introduction to superconductivity 1995." (Dover Books on Physics).
- Pracht, U. S. et al., 2012. "Electrodynamics of the Superconducting State in Ultra-Thin Films,"3, 3, 1–8.
- Savinov, V., Fedotov, V. A., Anlage, S. M., Groot, P. A. J. D. and Zheludev, N. I. 2012. "Modulating sub-THz radiation with current in superconducting metamaterial", Phys. Rev. Lett.109, 243904.
- Shibata, H. et al., 2001."Far-infrared optical conductivity of YBCO single crystal thin films from transmission and reflection spectra", J. Phys. Chem. Sol., 62,1–2, 253–256.
- Onnes, H. K., 1911. "The resistance of pure mercury at helium temperatures", Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden, 12, 120.
- Otter, W. J., Hu, F., Hazell, J., Lucyszyn, S. 2014."From mm-wave to THz: Scalable Filter Design for Ultra-low Cost Applications", Int. Conf. Semicon. Mid-IR Mat. and Opt., 5–6.
- Ozbay, E., Aydin, K., Bulut, I. Guven, K. 2007. "Negative refraction, subwavelength focusing and beam formation by photonic crystals", Journal of Physics D: Applied Physics, 40, 2652.
- Ozbay, E., Aydin, K., Cubukcu, E., Bayindir, M. 2003. "Transmission and Reflection Properties of Composite Double Negative Metamaterials in Free Space", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 51, 2592.
- Ozbay, E., Li, Z., Aydin, K. 2008. "Super-resolution imaging by one-dimensional, microwave left-

handed metamaterials with an effective negative index”, *Journal of Physics Condensed Matter*, 20, 304216.

Ozyuzer, L., Koshelev, A. E., Kurter, C., Gopalsami, N., Li Q., Tachiki, M., Kadowaki, K., Yamamoto, T., Minami, H., Yamaguchi, H., Tachiki, T., Gray, K. E., Kwok W.K., Welp U. 2007 “Emission of Coherent THz Radiation from Superconductors”, *Science*, 318, 1291.

Ozyuzer, L., Simsek, Y., Koseoglu, H., Turkoglu, F., Kurter, C., Welp, U., Koshelev, A. E., Gray, K. E., Kwok, W. K., Yamamoto, T., Kadowaki, K., Koval, Y., Wang, H. B., Muller, P. 2009. "Terahertz wave emission from intrinsic Josephson junctions in high-Tc superconductors", *Supercond. Sci. Technol.*, 22, 114009.

Ozyuzer, L., Zasadzinski, J. F., Gray, K. E., Hinks, D. G., Miyakawa, N. 2003. "Probing the Phase Diagram of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ with Tunneling Spectroscopy", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 13, 893.

Ozyuzer, L., Zasadzinski, J.F., Miyakawa, N., Kendziora, C., Sha, J., Hinks, D.G., Gray, K.E. 2000. "Tunneling Spectroscopy of Heavily Underdoped Crystals of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ ", *Physica C*, 927, 341-348.

Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., Stewart, W. J. 1999. “Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena”, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 47, 2075-2084.

Pendry, J. B., *Phys. Rev. Lett.* 2000. “Negative Refraction Makes a Perfect Lens”, 85, 3699.

Porterfield, D., W., Hesler, J. L., Densing, R., Mueller, E. R., Crowe, T. W., Weikle II, R. M. 1994. “Resonant metal-mesh bandpass filters for the far infrared”, *Applied Optics*, 33; 25, 6046–6052.

Ricci M. C., Xu H., Prozorov R., Zhuravel A. P., Ustinov A. V., Anlage S. M. 2007. “Tunability of superconducting metamaterials”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 17, 918–21.

Ricci, M. C., Anlage, S. M. 2006. “Single superconducting split-ring resonator electrostatics”, *Appl. Phys. Lett.*, 88, 264102.

Sabah, C. 2011. “Multiband planar metamaterials”, *Microwave and Optical Technology Letters*, 53, 2255-2258.

Sabah, C. and Roskos H. G. 2011. “Numerical and experimental investigation of fishnet-based metamaterial in a X-band waveguide”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44, 255101.

Sabah, C., Thomson, M. D., Meng, F., Tzanova, S., and Roskos, H. G. 2011. “Terahertz propagation properties of free-standing woven-steel-mesh metamaterials: Pass-bands and signatures of abnormal group velocities”, *Journal of Applied Physics*, 110, 064902.

Savinov, V., Fedotov, V. A., Anlage, S. M., Groot, P. A. J., Zheludev, N. I. 2012. “Modulating sub-THz radiation with current in superconducting metamaterial”, *Phys. Rev. Lett.*, 109, 243904.

Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cummer, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F., Smith, D. R. 2006. “Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies”, *Science*, 314-5801, 977.

Singh, R., Chowdhury, D. R., Xiong, J., Yang, H., Azad, A. K., Taylor, A. J., Jia, Q. X., Chen, H-T. 2013. “Influence of film thickness in THz active metamaterial devices: A comparison between superconductor and metal split-ring resonators”, *Applied Physics Letters*, 103, 061117.

Schrieffer F. S. U., Robert John 2007. (National High Magnetic Field Laboratory, Handbook of high-temperature superconductivity.

Smith D. R., Vier D. C., Koschny Th., Soukoulis C. M. 2005. "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials", Phys. Rev. E, 71, 036617.

Smith D.R., S.Schultz, Markoš P., Soukoulis C.M. 2002. "Determination of negative permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients", Phys. Rev. B, 65, 195104.

Smith, D. R., Gollub, J., Mock, J. J., Padilla, W. J., Schurig, D. 2006. "Calculation and measurement of bianisotropy in a split ring resonator metamaterial", J. Appl. Phys., 100, 024507.

Smith, D. R., Pendry, J. B., Wiltshire, M. C. K. 2004. "Metamaterials and Negative Refractive Index", Science 305, 788.

Turkoglu, F., Ozyüzer, L., Koseoglu, H., Demirhan, Y., Preu, S., Malzer, S., Simsek, Y., Wang, H.B., Muller, P. 2013. "Emission of the THz waves from large area mesas of superconducting Bi₂Sr₂CaCu₂O₈+ δ by the injection of spin polarized current", Physica:C Superconductivity, 491, 7.

Mikhail A. Noginov. 2011, Tutorials in Metamaterials.

Uchiyama, T., Uchida T. 2007. "Control of In-Plane-Orientation of Bi-2212 Thin Films Prepared by the Metal-Organic Decomposition Method", IEEE Trans. on Appl. Supercond 17, 2.

Voisiat, B., Biciunas, A., Kašalynas, I., Raciukaitis, G. 2011. "Band-pass filters for THz spectral range fabricated by laser ablation", Appl. Phys. A, 104, 953–958.

Winnewiser, C., Lewer, F., Weinzier, J., Helm, H. 1999. "Transmission features of frequency selective surface components in the far infrared determined by terahertz time domain spectroscopy", Applied Optics 38;18.

Vendik, O. G., Vendik, I. B., and Kaparkov, D. I. 1998. "Empirical model of the microwave properties of high-temperature superconductors" IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 46, 5, 469–478.

Yazici, S., Olgar, M. A., Akca, F. G., Cantas, A., Kurt, M., Aygun, G., Tarhan, E., Yanmaz, E., Ozyuzer, L. 2015. "Growth of Cu₂ZnSnS₄ absorber layer on flexible metallic substrates for thin film solar cell applications", Thin Solid Films, 589.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. LÜTFİ ÖZYÜZER
Proje No:	114F091
Proje Başlığı:	Süperiletken Metamalzeme Temelli Terahertz Bant-Geçirgen Filtreler
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	HAKAN ALTAN, CUMALİ SABAH
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENS. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2014 - 01/10/2016
Onaylanan Bütçe:	343000.0
Harcanan Bütçe:	294138.58
Öz:	<p>Bu projede süperiletken filmlerinden terahertz dalgaboyunda çalışabilen metamalzeme filtreler yapılması amaçlanmıştır. Öncelikle nümerik simülasyonlarla Terahertz aralığında çalışan metal ve süperiletken metamalzeme filtreler tasarlanmıştır. Tasarlanan ve modellenen filtreler, fused silika alttaşlar üzerine büyütülmüş Au ve Cr ince filmler üzerinde şekillendirilmiştir ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsünde bulunan Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) ile karakterize edilmiştir. Daha sonra ODTÜ'de filtrelerin Terahertz zamana dayalı spektroskopisiyle ölçümleri alınmıştır. Bu çalışmalar raporda detaylı olarak verilmiştir. Filtre tasarım ve üretimine paralel olarak süperiletken Bi₂Sr₂CaCu₂O₈+d (Bi2212) ince filmlerinin büyütülme çalışmaları yapılmıştır. Bi2212 ince filmleri c düzlemleri (0001) safir ve MgO alttaş üzerine (Bi2212) hedef stokiyometrik oranlardaki Bi₂O₃, SrCO₃, CaCO₃ ve CuO tozlarından kalsinasyon, presleme ve sinterleme işlemleriyle hazırlanmıştır.) prosedürleri detaylı bir şekilde belirtilen kendi hazırladığımız hedef ve satın alınan hedef ile DC ve RF güç kaynağı ile farklı parametrelerde büyütülmüştür. İki farklı hedef ile büyütülen örnekler karşılaştırılmıştır. Yapısal karakterizasyon için ince filmlerin EDX (Enerji Dağılımlı X-Işınları Mikroanaliz Spektrometresi) ve XRD (X-ışını difraksiyon spektroskopisi) analizleri yapılmıştır. Bi2212 ince filmlerinin Taramalı Elektron Mikroskobu ile SEM görüntüleri alınmıştır. Üretilen hedef ve büyütülen filmlerin direnç sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Bu çalışmalar da raporda detaylı olarak verilmiştir. Proje için özgün kuadkross metamalzeme filtre yapısı tasarlanmış ve hem altın hem YBCO ince film üzerine üretilmiştir. Kuadkross metamalzeme filtrelerin geçirgenlik özelliklerini THz zamana dayalı spektroskopisi ile kapalı He kroyostat sisteminde ölçülmüştür. Sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmış, projede çalışan her üç araştırma grubunun öğrencileri ve araştırmacı öğretim üyeleri projenin devam ettiği 2 yıl boyunca düzenli olarak İzmir, Kıbrıs ve Ankara'da toplanmış ve projenin durumu ve sonuçlar hakkında fikir alışverişinde bulunmuştur.</p> <p>Bu proje ile ilgili yapılan çalışmalar Tera-Mir 2015, Şişecam 2015, IPCAP 2016, CLEO/Europe 2015, Quantum Metrology 2016, SMMO 2016, SATF 2016, Şişecam 2016 konferanslarında bildiri olarak sunulmuştur (EK 1). Ayrıca SCI tarafından taranan Opt. Quant. Electron. dergisinde makale basılmış (Y. Demirhan vd., 2016, EK 2) ve diğer bir çalışmada yine aynı dergide (C. Sabah vd., EK 3) kabul edilmiş ve yayımlanmıştır. Diğer bir çalışmada Superconducting Science and Technology (Y. Demirhan vd., EK 4) dergisine gönderilmiştir ve hakem değerlendirilmesindedir.</p>
Anahtar Kelimeler:	süperiletken, metamalzeme, Terahertz, ince film
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Metal mesh filters based on Ti, ITO and Cu thin films for terahertz waves (Makale - Diğer Hakemli Makale),