



**YBCO SÜPERİLETKEN DALGA
REZONATÖRÜNÜN PERFORMANSININ
İYİLEŞTİRİLMESİ**

Aykut COŞKUN

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektronik Bilim Dalı
Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL**

2017

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YBCO SÜPERİLETKEN DALGA REZONATÖRÜNÜN
PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

Aykut COŞKUN

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Elektronik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2017**

Her hakkı saklıdır



**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TEZ ONAY FORMU

**YBCO SÜPERİLETKEN DALGA REZONATÖRÜNÜN PERFORMANSININ
İYİLEŞTİRİLMESİ**

Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL danışmanlığında, Aykut COŞKUN tarafından hazırlanan bu çalışma 08/02/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı – Elektronik Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği/oyçokluğu** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

İmza:

Üye: Doç. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU

İmza:

Üye: Yrd. Doç. Dr. Ahmet DUMLU

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 23/02/2017 tarih ve 8 / 30 nolu kararı
ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Tübitak projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 113R018

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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YBCO SÜPERİLETKEN DALGA REZONATÖRÜNÜN PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Aykut COŞKUN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektronik Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Tez kapsamında YBaCuO (YBCO) süperiletkeni kullanılarak farklı yöntem ile mikrodalga rezonatörü üretimi hedeflendi. Soğutma işlemi için sıvı azot kullanıldı. YBCO rezonatöre ait S parametreleri ölçüldü. S parametreleri değerinden YBCO rezonatörlerinin kalite faktörleri hesaplandı. Literatüre uyumlu olarak 10^2 ile 10^3 mertebesinde olduğu saptandı. Vorteks nedeni ile rezonatörde kalite faktörü düşük olduğundan dolayı kayıplar fazladır. Antidotları olmayan rezonatörlerin aksine, vorteks kaynaklı kayıplarda belirgin bir düşüş vardır. Bu yüzden antidotlar, uygulanan güç üzerinde kalite faktörünü artırmaktadır.

2017, 56 sayfa

Anahtar Kelimeler: YBCO, mikrodalga rezonatör, süperiletken elektroniği, vorteks

ABSTRACT

Master Thesis

IMPROVING THE PERFORMANCE OF YBCO SUPERCONDUCTING WAVE RESONATOR

Aykut COŞKUN

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering
Department of Electronics

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

In the tesis proposal, it is aimed to construct a microwave resonator with another method using YBaCuO (YBCO) superconductor. Liquid nitrogen is used for cooling operation. S parameter of YBCO resonators were measured. The quality factors of the resonators were calculated from the S parameters. They found to be between 10^2 and 10^3 which are compatible with the literature. There are higher losses because of the low quality factor in the resonator due to vortex. In comparison to resonators without antidots, it is found a significant reduction of vortex induced losses. Thus increased quality factors applied powers.

2017, 56 pages

Keywords: YBCO, microwave resonator, superconducting electronics, vortex

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans döneminde danışmanlığımı yapan, araştırmalarımın her aşamasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL'a en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen yüksek lisans öğrencisi Ahmet ÖZMEN'e ve Gökhan UYGUR'a çok teşekkür ederim.

ESKİ Genel Müdürlüğü yöneticilerinden Teftiş Kurulu Başkanı Rahmi SERGİLİ'ye ve Muhasebe Müdürü Abdurrahim ÇINTAŞ'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim. ESKİ Genel Müdürlüğünde en çok sevdiğim mesai arkadaşım Semahattin BOZKURT'a yardımlarından dolayı saygılarımı sunarım.

Anneme, babama, abime ve hayat arkadaşşıma desteklerinden dolayı minnettarım.

Aykut COŞKUN

Şubat, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Süperiletkenliğin Tarihçesi.....	1
1.2. Süperiletkenliğin Bileşenleri	2
1.2.1. Kritik sıcaklık değeri (T_c).....	2
1.2.2. Kritik akım yoğunluğu (J_c).....	3
1.2.3. Kritik manyetik alan (H_c)	4
1.3. Meissner Etkisi	5
1.4. I. ve II. Tip Süperiletkenler	6
1.5. BCS Teoremi	8
1.6. Cooper Çifti.....	8
1.7. Süperiletken Dalga Rezonatörünün Kalite Faktörü Ölçümü.....	10
1.8. Rezonans Devreleri	11
1.8.1. Seri rezonans devreleri	11
1.8.2. Paralel Rezonans Devreleri	13
1.9. YBCO Süperiletken Mikrodalga Rezonatörünün Teknolojik Uygulamaları	16
1.9.1. Süperiletken Kuantum Girişim Cihazları (SQUID)	16
1.9.2. Elektronik devreler	17
1.9.3. Süperiletken Mikrodalga Rezonatör Filtreleri.....	18
1.9.4. Kablosuz elektrik iletiminde rezonatörler	29
1.10. Süperiletkenliğin Diğer Uygulama Alanları.....	30
1.10.1 Maglev trenleri (Uçan trenler).....	30
1.10.2. İletim hatları	31
2. KAYNAK ÖZETLERİ	33

3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	38
3.1. YBCO Malzeme Hazırlanması.....	38
3.2. Serigrafi (Screen Printing).....	40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	49
5. SONUÇ	55
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	57



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

YBCO	YBaCuO
T_c	Kritik Sıcaklık
H	Manyetik Alan
H_c	Kritik Manyetik Alan
H_{c1}	Kritik Manyetik Alanın alt limit değeri
H_{c2}	Kritik Manyetik Alanın üst limit değeri
I_c	Kritik Akım değeri
J_c	Kritik Akım yoğunluğu
μ	Manyetik geçirgenlik
μ_0	Boşluğun Manyetik geçirgenliği

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Civa direnç değerinin sıcaklık ile değişim grafiği	1
Şekil 1.2. Malzemelerin kritik sıcaklık değerinin tarihsel değişimi	2
Şekil 1.3. Direnç değerinin sıcaklıkla değişimi	2
Şekil 1.4. Kritik manyetik alan değerinin sıcaklıkla değişimi	4
Şekil 1.5. Malzemenin Akım yoğunluğu, sıcaklık ve manyetik alan için kritik diyagramı.....	4
Şekil 1.6. Kritik sıcaklığa göre Meissner etkisi	5
Şekil 1.7. Meissner etkisi sonucunda havada asılı kalan mıknatıs	5
Şekil 1.8. Meissner etkisi levitasyon durumu	6
Şekil 1.9. I. Tip ve II. Tip süperiletkenlerde manyetik alanın sıcaklıkla değişimi	7
Şekil 1.10. II. Tip süperiletkenlerin faz diyagramları.....	7
Şekil 1.11. John Bardeen, Leon Neil Cooper ve J.Robert Schrieffer	8
Şekil 1.12. Negatif yüklü iyonun atom örgüsünün içinden geçmesi	9
Şekil 1.13. Elektronun atom örgüsü içerisinde geçerken pozitif yüklü iyonlar ile etkileşimi sonucu oluşan sarı renk ile gösterilen Cooper elektron çiftleri ve örgünün şekil değişimi	9
Şekil 1.14. Cooper çifti	9
Şekil 1.15. Kalite faktörü ölçüm karakteristiği grafiği	10
Şekil 1.16. Seri RLC devresi.....	12
Şekil 1.17. Seri RLC devresi frekans empedans grafiği ($\omega=\omega_0$ rezonans durumu)	12
Şekil 1.18. Seri RLC devresinin faz diyagramı ($\omega=\omega_0$ rezonans durumu)	13
Şekil 1.19. Paralel RLC devresi	13
Şekil 1.20. Paralel RLC devresi frekans empedans grafiği ($\omega=\omega_0$ rezonans durumu)....	14
Şekil 1.21. Paralel RLC devresinin faz diyagramı ($\omega=\omega_0$ rezonans durumu).....	14
Şekil 1.22. Tek katlı akortlu yükselteç.....	14
Şekil 1.23. Bir, iki, üç ve dört katlı akortlu yükselteçler için Bode diyagramı	15
Şekil 1.24. Süperiletken kuantum girişim cihazı devresi örneği	16
Şekil 1.25. Süperiletken madde kullanılarak yapılan dizüstü bilgisayar	17
Şekil 1.26. Radar sisteminin blok diyagramı	18

Şekil 1.27. Dijital RF verici blok diyagramı.....	19
Şekil 1.28. Süperiletken mikroelettronik çip ile analog filtre bileşimi	20
Şekil 1.29. 7 kutuplu yüksek sıcaklık süperiletken bant geçiren filtre	21
Şekil 1.30. 7 elemanlı bant geçiren filtre devre modeli	22
Şekil 1.31. 7 kutuplu bant geçiren filtre simülasyonu	22
Şekil 1.32. a) Tek rezonatör yerleşimi b) Tek rezonatör için grup gecikme eğrisi.....	23
Şekil 1.33. a) İki rezonatör yerleşimi b) İki rezonatör için grup gecikme eğrisi	23
Şekil 1.34. a) Üç rezonatör yerleşimi b) Üç rezonatör için grup gecikme eğrisi.....	24
Şekil 1.35. a) Dört rezonatör yerleşimi b) Dört rezonatör için grup gecikme eğrisi	24
Şekil 1.36. 7 kutuplu olarak üretilmiş bant geçiren filtre resmi.....	25
Şekil 1.37. 8 kutuplu bant geçiren filtre simülasyonu	25
Şekil 1.38. 3 Kutuplu alçak geçiren filtrenin 3 boyutlu modellemesi	26
Şekil 1.39. 3 kutuplu bant durduran filtrenin devre modellemesi.....	26
Şekil 1.40. 3 kutuplu bant durduran filtrenin 3 boyutlu modellemesi	27
Şekil 1.41. 3 kutuplu bant durduran filtrenin simülasyon sonucu	27
Şekil 1.42. Rezonatör ile kablosuz elektrik iletimi	29
Şekil 1.43. Maglev treni.....	31
Şekil 1.44. Yapısında süperiletken malzeme bulunduran kablo	32
Şekil 2.1. Rezonatör modelleri.....	34
Şekil 2.2. Sabit uygulanan güç (P_{app}) için rezonatör eğrisi	35
Şekil 2.3. Beş farklı rezonatörün vorteks bağlantılı enerji kayıpları	36
Şekil 2.4. Beş farklı rezonatör için (a) $1/Q_v(P_{app})$ (b) $Q(P_{app})$	36
Şekil 2.5. Rezonatör tasarımı	37
Şekil 2.6. YBCO malzemeden üretilmiş rezonatör örneği	37
Şekil 3.1. Bezir yağının kaynatılması	38
Şekil 3.2. Bezir yağı-Xylene-Alpha Terpinol karışımının ısıtılması	39
Şekil 3.3. Bezir yağı-Xylene-Alpha Terpinol karışımı ile oluşan pasta	39
Şekil 3.4. Pasta-YBCO karışımı	40
Şekil 3.5. Serigrafi sistemi	41
Şekil 3.6. Serigrafide kullanılan sıkmaçlar	42
Şekil 3.7. Sıkmaç çeşitleri.....	43
Şekil 3.8. Ürettiğimiz Rezonatörün alt tabakası İzolab Cam	43

Şekil 3.9. Isıtma işlemi yapılan fırın.....	44
Şekil 3.10. YBCO Rezonatör üretiminde kullanılan maske	44
Şekil 3.11. Üretilen rezonatörün boyutu ($2 \times 3.5 \text{ cm}^2$ cam üzerine yapıldı).....	45
Şekil 3.12. Üretilen diğer rezonatörün boyutu ($2 \times 4.5 \text{ cm}^2$ cam üzerine yapıldı).....	45
Şekil 3.13. Fırın işleminden sonra üretilen YBCO rezonatörler.....	46
Şekil 3.14. Üretilen rezonatörlerin fazlalıkların alınmasından sonraki resmi	46
Şekil 3.15. YBCO rezonatörünün optik mikroskopi görüntüsü.....	47
Şekil 3.16. YBCO rezonatörünün optik mikroskopi görüntüsünün parçaları.....	47
Şekil 3.17. YBCO rezonatörünün RLC eşleniği.....	47
Şekil 3.18. YBCO rezonatör ölçüm sistemi.....	48
Şekil 4.1. CST Microwave Studio program ile yapılan rezonator simülasyon çalışması	49
Şekil 4.2. Projedeki YBCO rezonatörünün simülasyon ile elde edilen S11 grafiğinin frekansa karşı değişimi	50
Şekil 4.3. YBCO'dan yapılmış rezonatöre ait S11 grafikleri	51
Şekil 4.4. YBCO'dan yapılmış rezonatöre ait S21 grafikleri	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Süperiletken ile iyi iletkenin karşılaştırılması	21
Çizelge 1.2. Pasif filtre çeşitleri ve transfer fonksiyonları.....	28

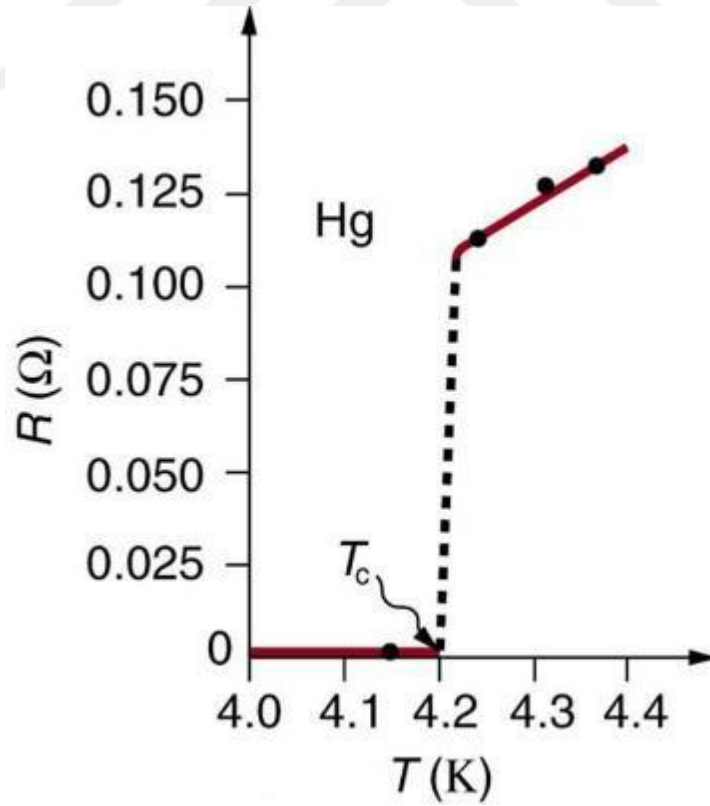


1. GİRİŞ

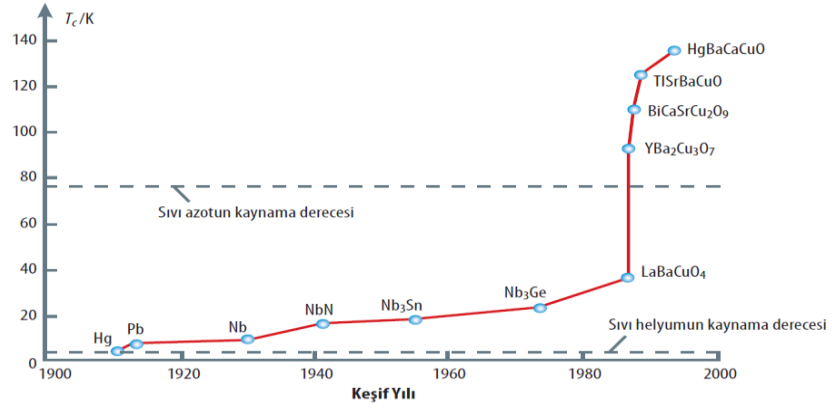
1.1. Süperiletkenliğin Tarihçesi

Hollandalı fizik bilim adamı Heike Kamerlingh Onnes tarafından 1908 yılında helyum sıvılaştırıldı. Bu gelişme süperiletkenliğin keşfedilmesinde ilk önemli adımdır. Helyumun sıvılaştırılması 4°K gibi çok düşük sıcaklıklara inebilmeye imkan sağladığından dolayı yeni keşiflere zemin hazırlamıştır.

Hollandalı fizik bilim adamı Heike Kamerlingh Onnes 1911 yılında cıvanın direnç değerinin 4.2°K değerinde aniden sıfıra düştüğünü gözlemlemiştir. Heike Kamerlingh Onnes 1913 yılında yapmış olduğu bu keşif ile Nobel fizik ödülünü kazandı.



Şekil 1.1. Cıva direnç değerinin sıcaklık ile değişim grafiği



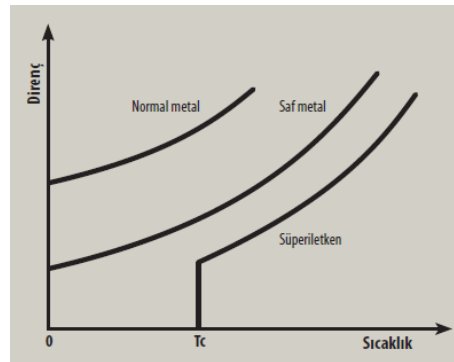
Şekil 1.2. Malzemelerin kritik sıcaklık değerinin tarihsel değişimi

Süperiletken olabilen metaller ve alaşımlar için sıvı helyum kullanılarak soğutma işlemi yapıılıyordu. Sıvı azot ile kritik sıcaklık değeri 77°K değerinden daha yüksek olan süperiletkenlerin elde edilmesi çok daha kolay oldu ve deneylerin maliyeti düştü.

1.2. Süperiletkenliğin Bileşenleri

1.2.1. Kritik sıcaklık değeri (T_c)

Süperiletkenlikte kritik sıcaklık, malzemenin metalik özelliklerinin değişmeye başladığı en yüksek sıcaklığın başlangıcı olarak açıklanır. Kritik sıcaklık değerinin altına düşüldükten sonra malzemenin direnç değeri sıfıra aniden düşer.



Şekil 1.3. Direnç değerinin sıcaklıkla değişimi

1.2.2. Kritik akım yoğunluğu (J_c)

Süperiletkenliğe geçişte bir diğer faktör akım yoğunluğudur. Süperiletken madde kritik sıcaklık değerinin üzerinde normal direnç gösterirken kritik sıcaklığın altında sıfır direnç gösteriyordu. Aynı şekilde süperiletken için kritik akım yoğunluğu içinde bu geçerlidir.

Silindirik yapıda r yarıçaplı ince bir süperiletken telde kritik akım yoğunluğunu inceleyelim. Bu telden geçen akıma I diyelim ve Amper Yasasını uygulayalım.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I = \mu_0 \iint \vec{J} \cdot d\vec{s} \quad (1.1)$$

Süperiletken telin etrafında Manyetik alan (B) oluşur.

$$B = \mu_0 I / 2\pi r \quad (1.2)$$

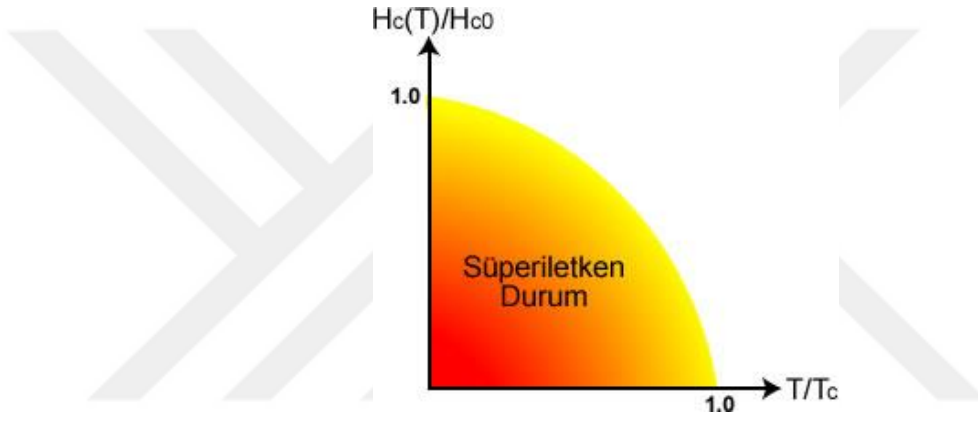
Manyetik alan değeri (B) kritik manyetik alan değerine ulaştığında teldeki akımda kritik akım değerine ulaşır.

$$I_c = 2\pi r \frac{B_c}{\mu_0} \quad (1.3)$$

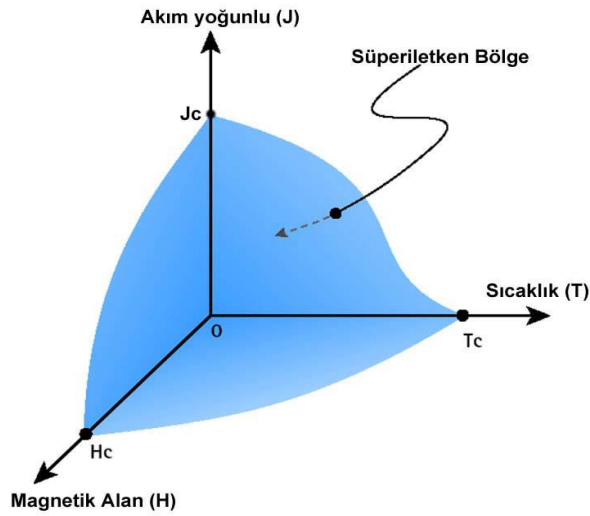
$$J_c = 2 \frac{B_c}{\mu_0 r} \quad (1.4)$$

1.2.3. Kritik manyetik alan (H_c)

Süperiletken kritik manyetik alan değerinin üzerinde normal direnç gösterirken manyetik alan değerinin altında sıfır direnç gösterir. Yani malzeme süperiletken durumunda dışarıdan manyetik alan uygulandığında kritik manyetik alan değerine kadar süperiletkenliğini korur. Süperiletkene kritik manyetik alan değerinden fazla manyetik alan uygulandığında süperiletkenlik durumu değişir.



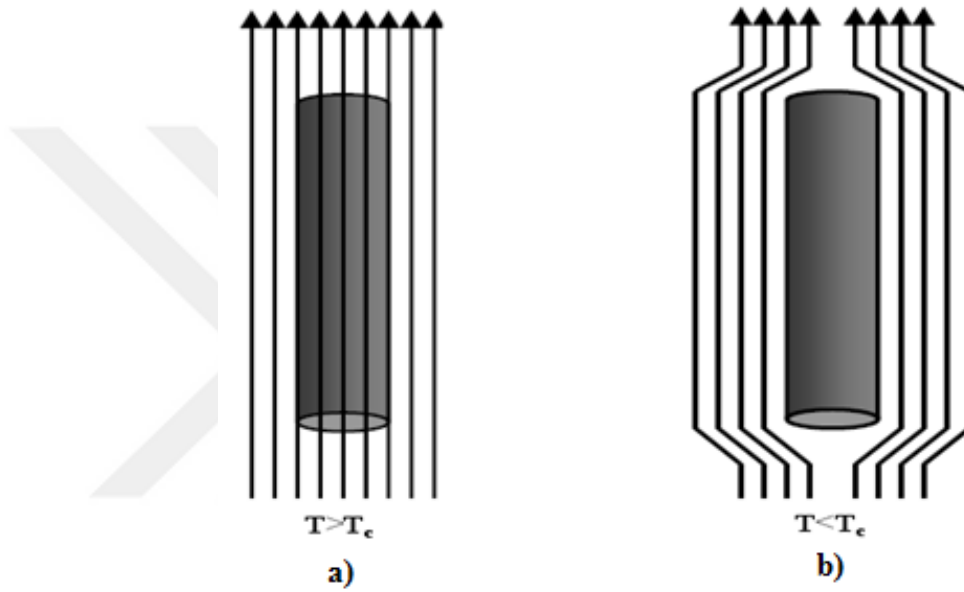
Şekil 1.4. Kritik manyetik alan değerinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 1.5. Malzemenin Akım yoğunluğu, sıcaklık ve manyetik alan için kritik diyagramı

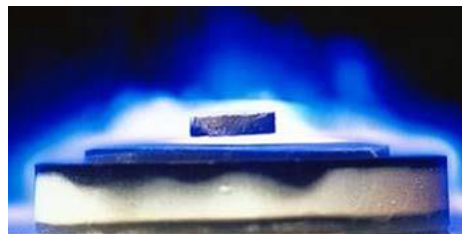
1.3. Meissner Etkisi

Manyetik alan içindeki bir süperiletken, T_c kritik sıcaklığının altına düşürüldüğünde süperiletken uygulanan manyetik alanı dışlar. Bu olaya Meissner Etkisi denir. Süperiletken içinde manyetik alan sıfır olur.



Şekil 1.6. Kritik sıcaklığa göre Meissner etkisi

Meissner etkisini gözlemlediğimiz en iyi gösterim levitasyon durumundaki kalıcı mıknatıs deneyidir. Meissner etkisi ile havada asılı kalan daimi bir mıknatısı aşağıda görmekteyiz.



Şekil 1.7. Meissner etkisi sonucunda havada asılı kalan mıknatıs

Sıvı azot ile soğutulmuş olan bir süperiletken disk üzerinde yer alan mıknatısın manyetik alanı, süperiletkende bir manyetik alan oluşmasını sağlar ve her iki manyetik alanın birbirini itmesi sonucunda mıknatıs havaya yükselir.



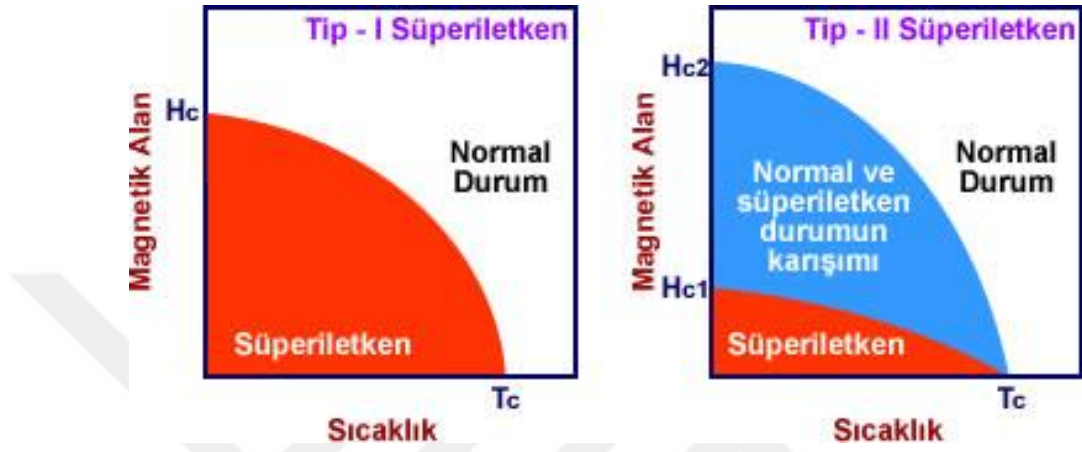
Şekil 1.8. Meissner etkisi levitasyon durumu

1.4. I. ve II. Tip Süperiletkenler

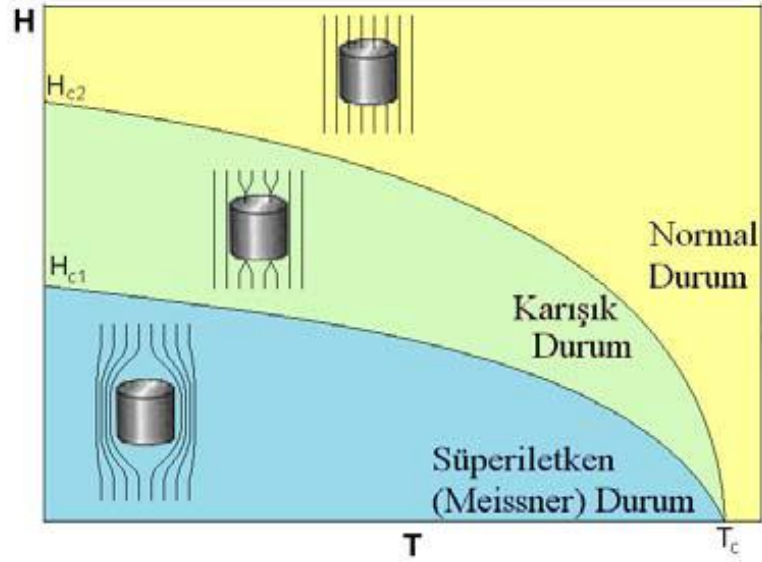
Süperiletken maddeler manyetik alana gösterdikleri tepkiye göre birinci ve ikinci tip olmak üzere iki gruba ayrılır. I. Tip süperiletkenler genellikle saf metallerdir. Geçiş metalleri II. Tip süperiletken sınıfına girer. I. Tip ve II. Tip süperiletkenler sıfır manyetik alan değerinde süperiletken normal geçişi benzer özelliklere sahiptir. I. Tip ve II. Tip süperiletkenler Meissner etkisi bakımında farklılık gösterirler. I. Tip süperiletkenler uygulanan manyetik alanı dışlar ancak kritik manyetik alan değerinin üstünde malzeme normal hale geçer.

II. Tip süperiletkenler H_{c1} kritik manyetik alan değerinin altında I. Tip süperiletkenlerin özelliğini gösterirler. Yani II. Tip süperiletkenler H_{c1} değerine kadar manyetik alanı dışlarlar ve negatif yönde mıknatıslanma özelliği gösterirler. H_{c1} kritik manyetik alan değeri “kritik manyetik alanın alt limiti” olarak ifade edilir. H_{c1} değerinin üstü değerlerde uygulanan manyetik alanlarda manyetik alan değerinin bir kısmı dışlanmaktadır ve bir kısmı da malzemeye nüfuz etmektedir. Malzeme süperiletkenliğini bu durumda bile kısmen sürdürebilmektedir. Ancak manyetik alan değeri H_{c2} olarak ifade edilen manyetik alanın üst kritik değerine ulaştığı zaman manyetik alanın tamamı malzemeye nüfuz eder ve süperiletkenlik yok olur.

H_{c1} değeri ve H_{c2} değeri arasında uygulanan manyetik alanlarda, malzemeler “karışık durum” olarak adlandırdığımız durumdadır. Karışık durumda süperiletken sıfır direnç değerine sahiptir. Ancak manyetik alan maddenin içindeki bazı bölgelere girer.

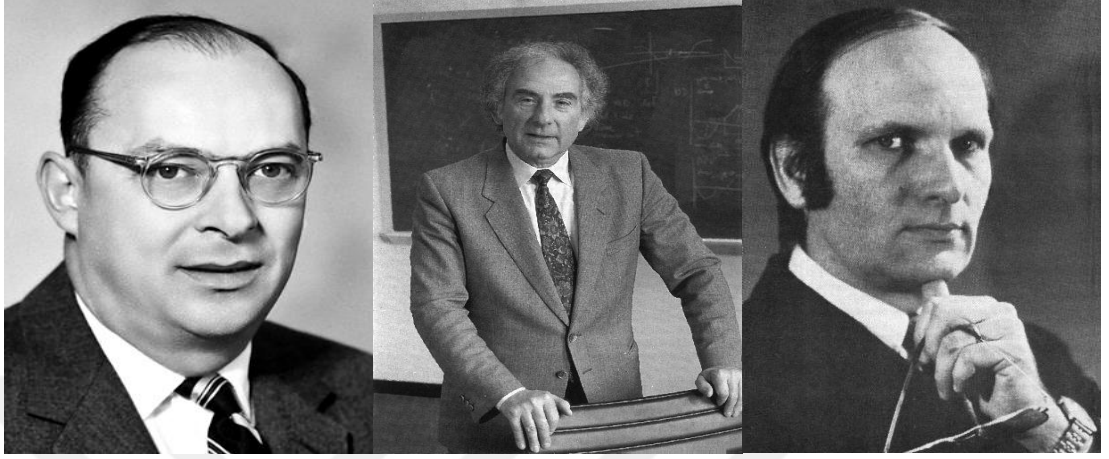


Şekil 1.9. I. Tip ve II. Tip süperiletkenlerde manyetik alanın sıcaklıkla değişimi



Şekil 1.10. II. Tip süperiletkenlerin faz diyagramları

1.5. BCS Teoremi



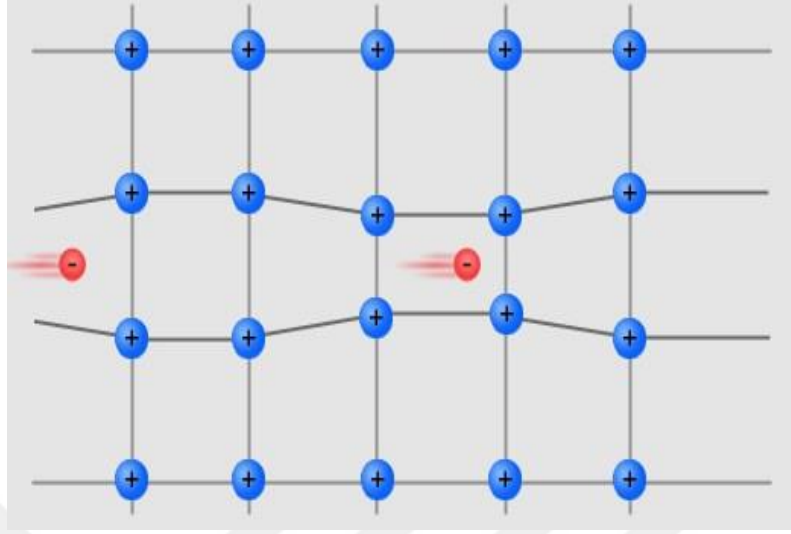
Şekil 1.11. John Bardeen, Leon Neil Cooper ve J.Robert Schrieffer

John Bardeen, J.Robert Schrieffer ve Leon Neil Cooper soyadlarının baş harflerinin bir araya getirilmesi ile oluşan ve BCS olarak adlandırılan teorilerini 1957 yılında açıkladılar.

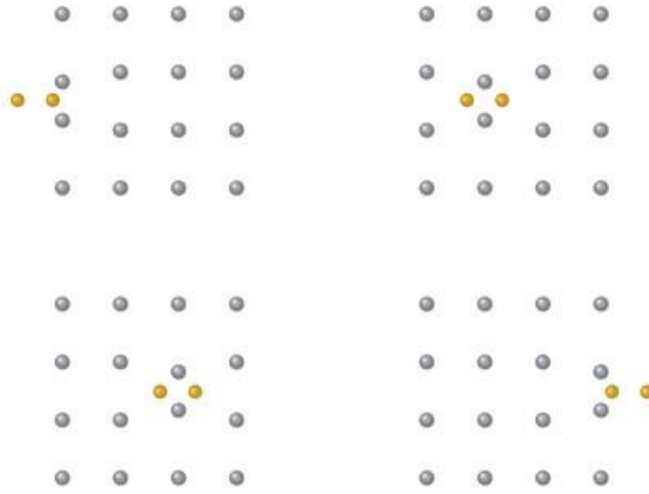
BCS teorisi elektronların kristal örgünün içinden geçerken, örgü içeri doğru bükülme göstermesini ifade eder. Fonon denen ses paketleri oluşur. Fononlar bozulmuş alanda pozitif yük yatağı oluşturarak arka taraftan gelen elektronların aynı bölgeden geçmesini sağlarlar. Bu durumda kritik sıcaklığın altında iki elektron fonon vasıtası ile etkileşerek birbirlerine bağlanırlar. Bu oluşan çiftte COOPER ÇİFTİ denir.

1.6. Cooper Çifti

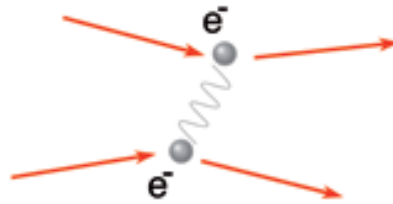
Cooper çiftleri negatif yüklü elektron atom örgüsünün içerisinden geçerken pozitif yüklü iyonlar ile elektromanyetik etkileşime geçerse Cooper çifti oluşur ve dolayısıyla atom örgüsünün şekli deforme olur. İsmi Leon Neil Cooper'dan alan Cooper çiftleri süperiletkenlerdeki akımın taşıyıcılarıdır.



Şekil 1.12. Negatif yüklü iyonun atom örgüsünün içinden geçmesi



Şekil 1.13. Elektronun atom örgüsü içerisinde geçerken pozitif yüklü iyonlar ile etkileşimi sonucu oluşan sarı renk ile gösterilen Cooper elektron çiftleri ve örgünün şekil değişimi



Şekil 1.14. Cooper çifti

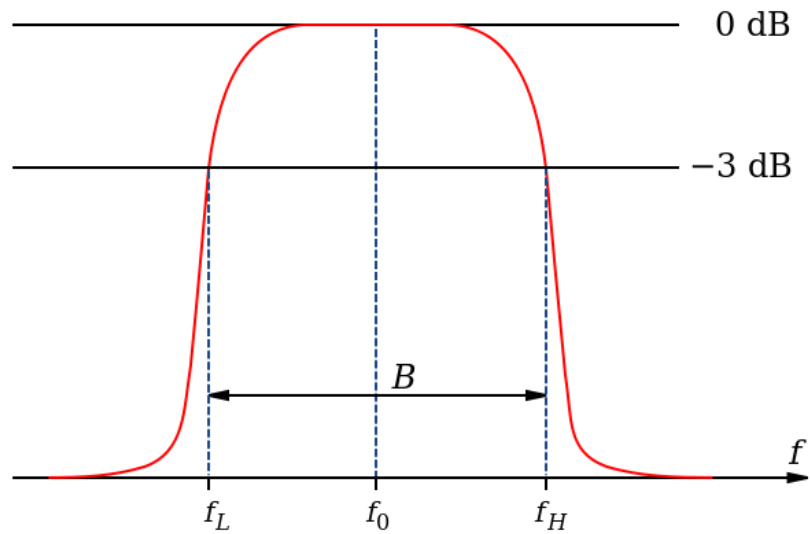
1.7. Süperiletken Dalga Rezonatörünün Kalite Faktörü Ölçümü

Osilasyon yapan bir sistemin çıkışındaki güç frekans ekseninde incelenirse, bu gücün sıfırdan başlayarak yükseldiği, kritik frekans değerinde maksimum değere ulaştığı ve daha sonra yeniden azalmaya başladığı görülür. Gücün maksimum düzeyin yarısı kadar olduğu frekanslar, yarı güç frekanslarıdır. Yarı güç frekans değerleri -3 dB noktaları olarak adlandırılır. İki yarı güç frekans değeri arasındaki fark değerine bant genişliği denir. Bant genişliği **B** ile veya Δf ile gösterilir.

$$P_{1/2}(dB) = 10 \cdot \log(1/2) = -3 \text{ dB} \quad (1.5)$$

$$Q = \frac{f_0}{B} \quad (1.6)$$

Yukarıda f_0 kritik frekans ve **B** bant genişliğidir. Her iki parametre **Hz** birimine sahip olduğundan dolayı kalite faktörünün birimi yoktur. Aşağıdaki şekilde f_L ve f_H gücün yarıya düştüğü frekans değerleridir.



Şekil 1.15. Kalite faktörü ölçüm karakteristiği grafiği

$$Q_o = \omega \frac{\text{Rezonatör içerisinde depolanan enerji}}{\text{Ortalama güç kaybı}} \quad (1.7)$$

Rezonatörün kalite faktörü yukarıdaki formül ile hesaplanmaktadır. Güç kaybı iletkenlik kaybı, dielektrik kaybı ve radyasyon kaybına bağlıdır.

$$1/Q_o = 1/Q_c + Q_r + Q_r = (\beta \cdot R_{yüz} / S) + \tan\delta + \alpha \cdot S \quad (1.8)$$

Yukarıdaki denklemde α katsayısı 6.5 GHz ve β katsayısı $3.9 \cdot 10^{-5}$ m/W değerindedir. S dielektriğin kalınlığını, $\tan\delta$ tanjant kaybını simgelemektedir. $R_{yüz}$ yüzey direncini göstermektedir.

$$Q_c = \omega \frac{\text{Rezonatör içerisinde depolanan enerji}}{\text{Omik dirençten dolayı güç kaybı}} \quad (1.9)$$

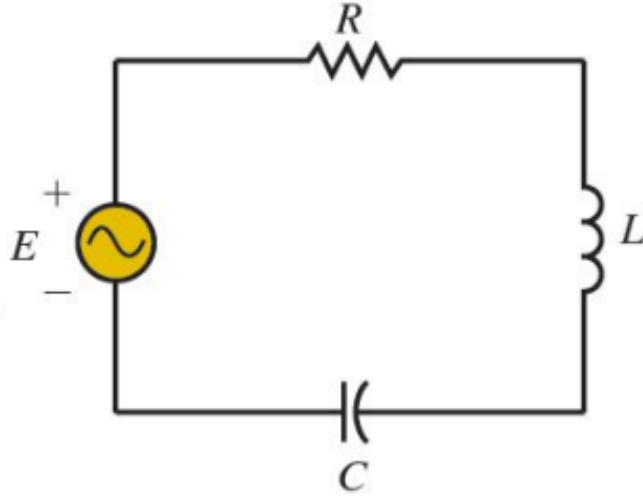
$$Q_d = \omega \frac{\text{Rezonatör içerisinde depolanan enerji}}{\text{Dielektrikten dolayı güç kaybı}} \quad (1.10)$$

$$Q_r = \omega \frac{\text{Rezonatör içerisinde depolanan enerji}}{\text{Işımadan dolayı güç kaybı}} \quad (1.11)$$

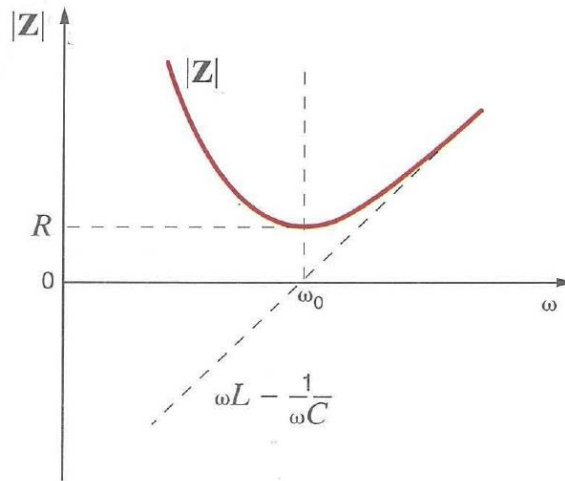
1.8. Rezonans Devreleri

1.8.1. Seri rezonans devreleri

Devrenin empedansının tamamen omik olduğu frekansa rezonans frekansı denir. Rezonans frekansında genlik ve akım aynı fazdadır. Bu yüzden güç faktörü bire eşittir ve faz açısı sıfırdır. Rezonans durumunda empedans minimum değerdedir. Bu yüzden akım değeri verilen gerilim değeri için maksimum değerdedir.

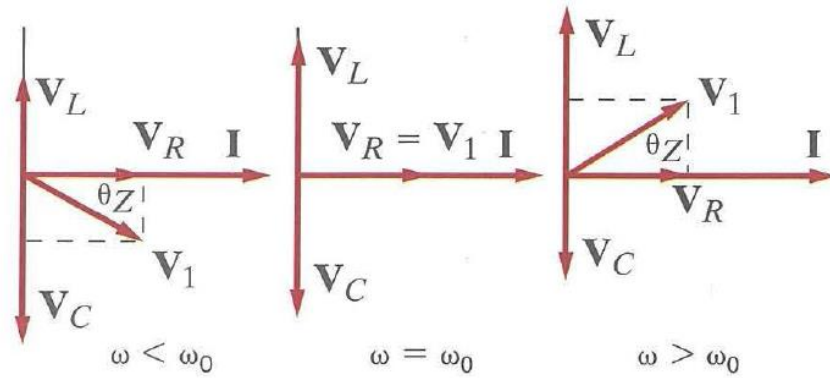


Şekil 1.16. Seri RLC devresi



Şekil 1.17. Seri RLC devresi frekans empedans grafiği ($\omega=\omega_0$ rezonans durumu)

Yukarıdaki şekilde düşük frekans değerlerinde seri RLC devrenin empedansında kapasitif terim baskın olduğu gözlemlenmektedir. Yüksek frekans değerlerinde ise endüktif terim baskın olmaktadır.



Şekil 1.18. Seri RLC devresinin faz diyagramı ($\omega=\omega_0$ rezonans durumu)

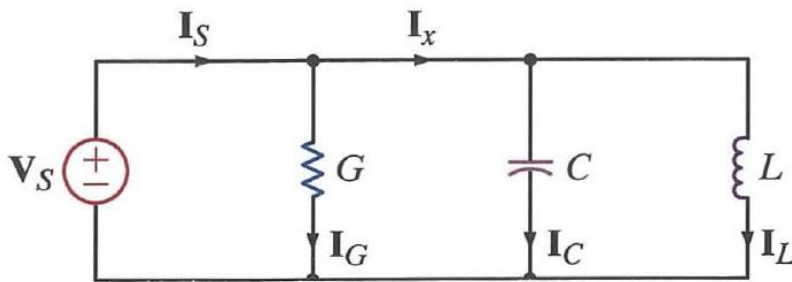
$$Z(j\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (1.12)$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (1.13)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.14)$$

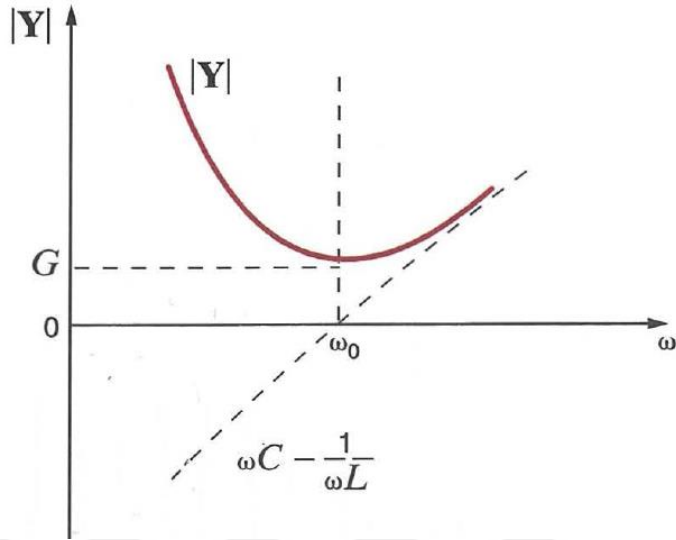
1.8.2. Paralel Rezonans Devreleri

Paralel ve seri rezonans devreleri benzerdir. Paralel ve seri rezonans devrelerinde birkaç farklılık vardır.

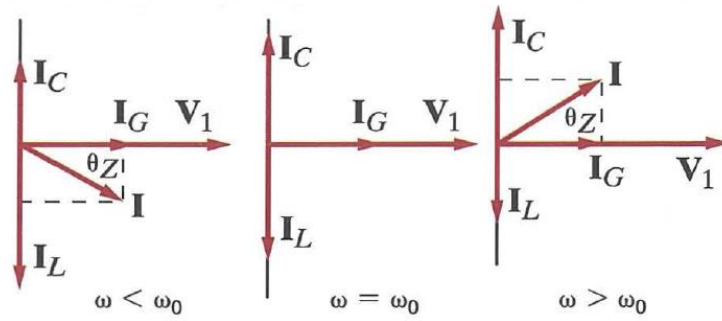


Şekil 1.19. Paralel RLC devresi

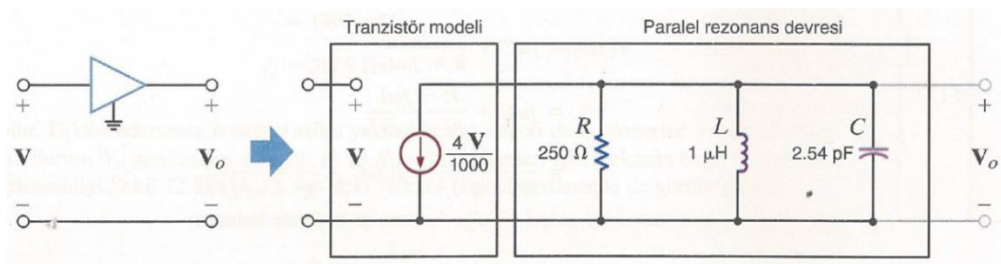
$$I_S = I_G + I_C + I_L = V_S \left[G + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \quad (1.15)$$



Şekil 1.20. Paralel RLC devresi frekans empedans grafiği ($\omega=\omega_0$ rezonans durumu)

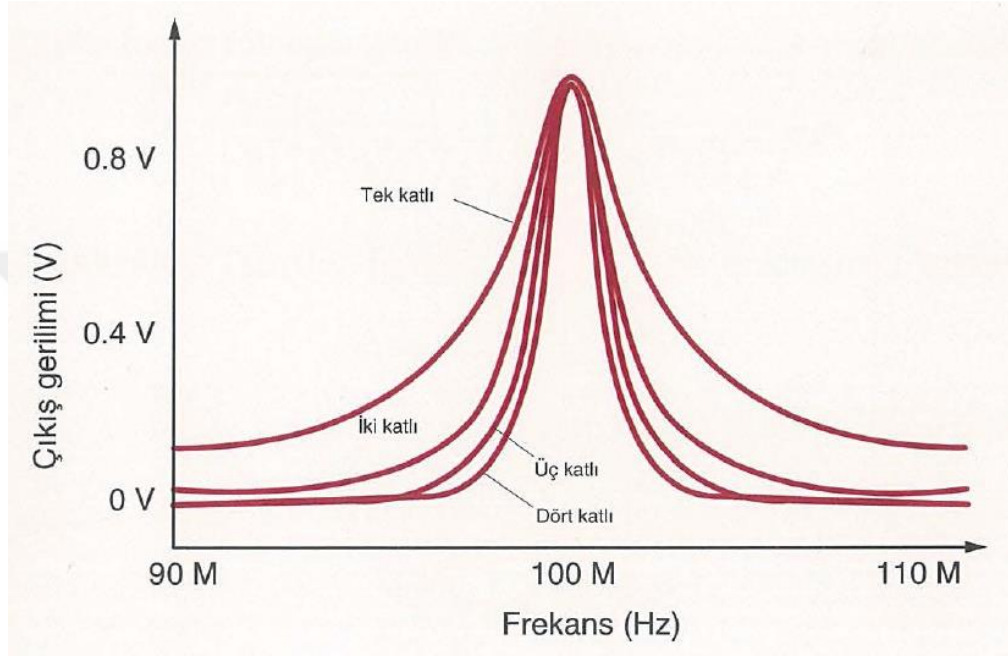


Şekil 1.21. Paralel RLC devresinin faz diyagramı ($\omega=\omega_0$ rezonans durumu)



Şekil 1.22. Tek katlı akortlu yükselteç

Tek katlı akortlu yükselteç, iki radyo istasyonundan bir tanesini seçmek için kullanılır. Tek katlı yükselteç bant genişliğinin geniş olmasından dolayı zayıf bir seçiciliğe sahiptir. Tek katlı yükselteçte bant genişliğini yükseltmek için yani kalite faktörünü artırmak için özdeş akortlu yükselteçler art arda bağlanmaktadır.



Şekil 1.23. Bir, iki, üç ve dört katlı akortlu yükselteçler için Bode diyagramı

$$L = (\mu_o / W) [d + 2\lambda \coth(\frac{t}{\lambda})] \quad (1.16)$$

$$f_o = \frac{c}{2l \sqrt{\epsilon_{et} [1 + \frac{\lambda}{d} \coth(\frac{t}{\lambda})]}} \quad (1.17)$$

$$C = \epsilon_o \epsilon_r \frac{W}{d} \quad (1.18)$$

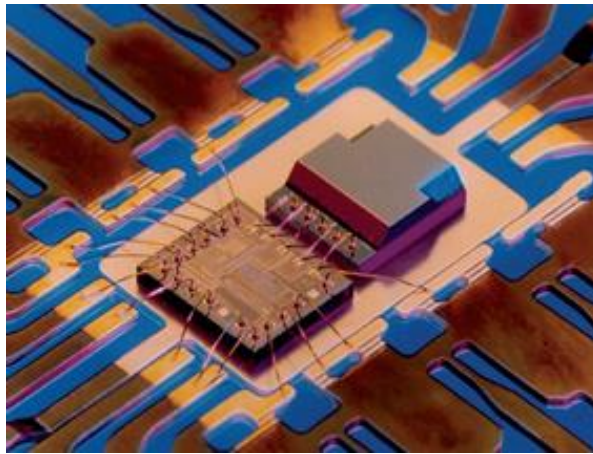
Yukarıdaki denklemlerde μ_o boşluğun manyetik alan geçirgenliği, W süperiletkenin kalınlığı, d dielektrik alttaşın kalınlığı, λ süperiletken malzemenin nüfuz etme derinliğidir. ϵ_{et} etkin dielektrik sabitini ve c ışık hızını göstermektedir.

1.9. YBCO Süperiletken Mikrodalga Rezonatörünün Teknolojik Uygulamaları

1.9.1. Süperiletken Kuantum Girişim Cihazları (SQUID)

1962 yılında Brian D. Josephson, kendisinden iki yıl önce Ivar Giaever'in keşiflerindende faydalananarak, süperiletken iki malzemenin arasında yalıtkan olan malzeme olsa bile elektrik akımının geçebileceğini öngördü. Josephson etkisi olarak bilinen bu buluşa göre ince süperiletken tabakada bulunan elektronlar çok dar 20 angstrom değerinden küçük yalıtkan ortamdan ekstra gerilim olmasa bile diğer süperiletken tabakaya tünelleniyorlar. Bu buluş Josephson'un 1973 yılında Nobel ödülü kazandırdı. Bu buluş Josephson kavşakları olarak bilinen teknolojinde oluşumunu sağladı. Günümüzde Josephson kavşakları anahtarlama ve duyumsama (switching and sensing) aracı olarak dijital ve analog elektronik devrelerde kullanılmaktalar.

Tek kavşaklı (single junction) sensör cihazlara örnek olarak X-ışını dedektörleri, frekans karıştırıcıları ve ileri-düzey kızılötesi sensörleri verebiliriz. En zayıf manyetik alanları bile hissedebilen süperiletken kuantum girişim cihazları, günümüzde materyal karakterizasyonunda, jeofiziksel araştırmalarda, beyin ve kalp fonksiyonlarının çözümlenmesinde aktif olarak kullanılmaktadırlar.



Şekil 1.24. Süperiletken kuantum girişim cihazı devresi örneği

Süperiletken kuantum girişim cihazları, manyetik akıyı süper akıma çevirme yolu ile en küçük manyetik alan değerlerini duyumsayabiliyor. Süperiletken kuantum girişim cihazlarının yaygın kullanıldığı alanlardan biriside sinir hücreleri tarafından üretilen manyetik dalgaların ölçümünü kapsayan insan beyin fonksiyonlarıdır. Süperiletken kuantum girişim cihazları, tümör alanının haritalanmasında, Alzheimer ve Parkinson gibi hastalıkların tespit edilmesinde kullanılmaktadır.

1.9.2. Elektronik devreler

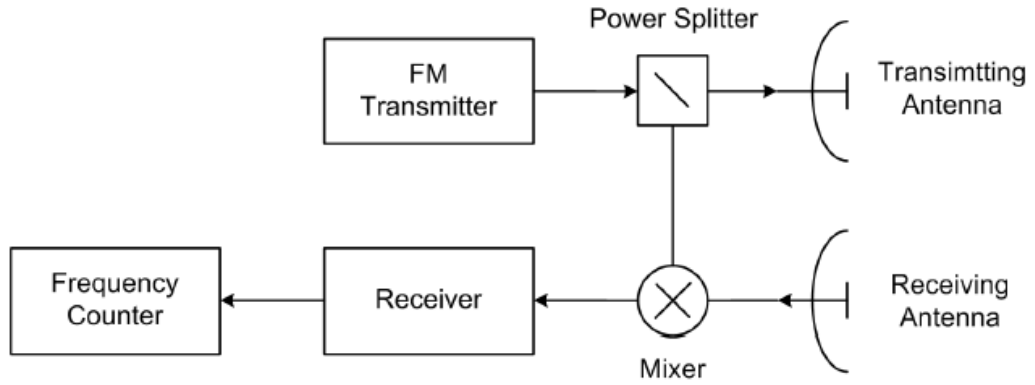
Çiplerde kullanılan kapasitörleri birbirlerine bağlayan metal filmlerin direnç sebebi ile ısınması, daha hızlı ve daha küçük bilgisayarların üretimini sınırlayan faktörlerden birisidir. Çipler için metal film yerine süperiletken ince filmler kullanıldığında CPU hızının arttığı, yapılan deneyler sonucunda kanıtlandı. Elektrik sinyallerinin bilgisayar mantık devrelerini hızlı bir şekilde açıp kapaması, bilgisayarın hızı açısından önemlidir. Süperiletken kuantum girişim cihazları, yarı iletkenler ile kıyaslandığında anahtar görevinde 10 kat daha hızlı olduğu gözlemlendi. Boyutu daha küçük ve çok hızlı bilgisayarları üretebilmek için ideal olduğu düşünülen süperiletken malzemelerin üstünlüğü, daha sonra üretilen metal oksit silikon alan transistörleri yani MOSFET ile azalsa da, bilim adamları süperiletken kuantum girişim cihazlarının bilgisayar devrelerinde anahtar olarak kullanılması üzerine çalışıyor.



Şekil 1.25. Süperiletken madde kullanılarak yapılan dizüstü bilgisayar

1.9.3. Süperiletken Mikrodalga Rezonatör Filtreleri

Süperiletken mikroelettronik (SME) teknolojisi, çok düşük güç tüketimi ile radyo frekansı sinyallerinin doğrudan sayısallaştırılmasını sağlayabilen çok yüksek hızdaki dijital alıcıları gerçekleştirme potansiyeline sahiptir. Süperiletken mikroelettronik teknolojisi iki tür RF filtresi gerektirmektedir. Bu filtrelerden biri bant geçiren filtre diğeri bant durduran filtredir. Band durduran filtre istenmeyen ya da parazit sinyalleri sönümlemektedir.

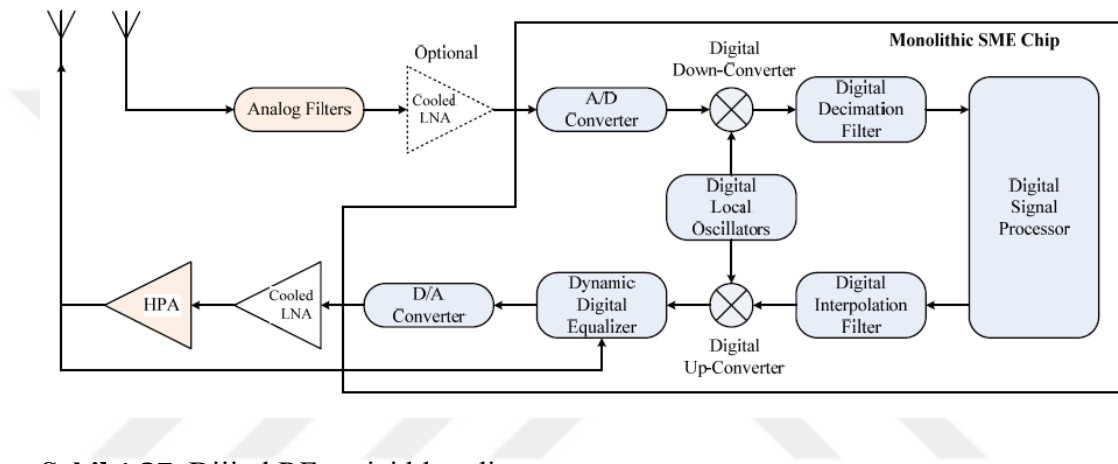


Şekil 1.26. Radar sisteminin blok diyagramı

Araç çarpışmasını engelleme sistemleri, helikopter iniş sistemleri ve buz tabakası tespit sistemleri gibi bir çok radar uygulaması vardır. Trafik radarları sinyal gönderme ve gönderilen sinyalin geri alınması prensibine dayanır.

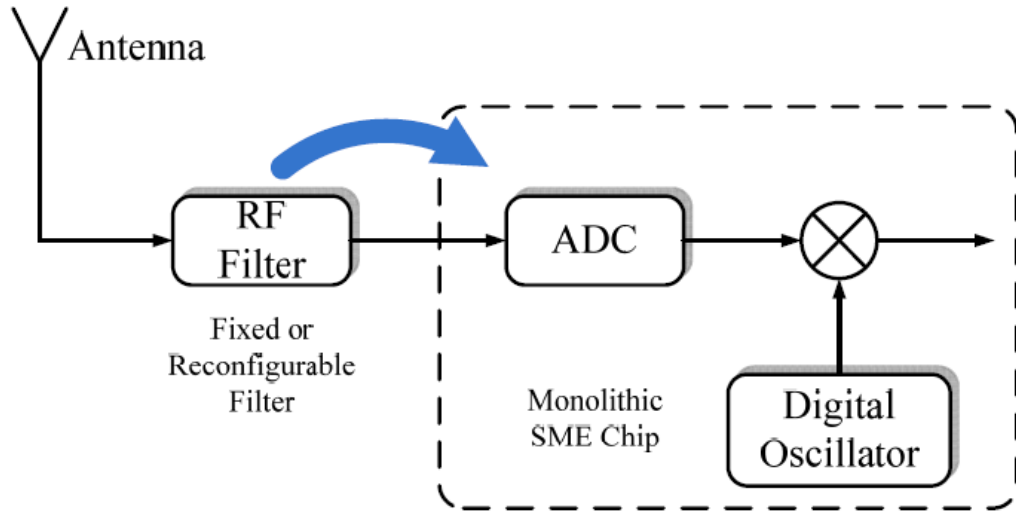
İki çeşit radar vardır. Bunlar radyo sinyali gönderen radarlar ve lazer sinyali gönderen radarlardır. Radarın çalışma prensibi, kendisine doğru gelmekte olan aracın plakasına denk gelecek şekilde iki farklı zaman için iki farklı sinyal göndermektedir. İlk olarak gönderilen sinyalin geri dönüş hızı ile ikinci gönderilen sinyalin geri dönüş hızı arasındaki fark dedektör dekodeerlerinden geçer. Yaklaşık olarak %10 sapmayla ortalama hız bulunur.

Radar sisteminin araç üzerinde plakaya odaklanması da tesadüf değildir. Araç plakaları kaliteli bir reflektörden yapılırlar ve üzerine hangi ışın gönderirirse gönderilsin geri atma özelliğine sahiptirler. Radyo sinyali ile çalışan radarlarda anlık frenleme ile ceza yemekten kurtulabilir fakat lazer ışını gönderen radarlarda mikro saniye bazlı hesap yapıldığı için genelde fren pedalına dokunmadan ceza yenmiş olur.



Şekil 1.27. Dijital RF verici blog diyagramı

Yukarıdaki blog diyagramda gösterilen analog filtre minimum gürültüye sahip önemli bir bileşendir. Süperiletken metal tabakalar ve çok ince dielektrik katmanlar, düşük gürültülü süperiletken filtreler için olanak sağlar.



Şekil 1.28. Süperiletken mikroelettronik çip ile analog filtre bileşimi

Bir düzlem dalga için bir malzemenin yayılma sabiti ve yüzey direnci aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} \quad (1.19)$$

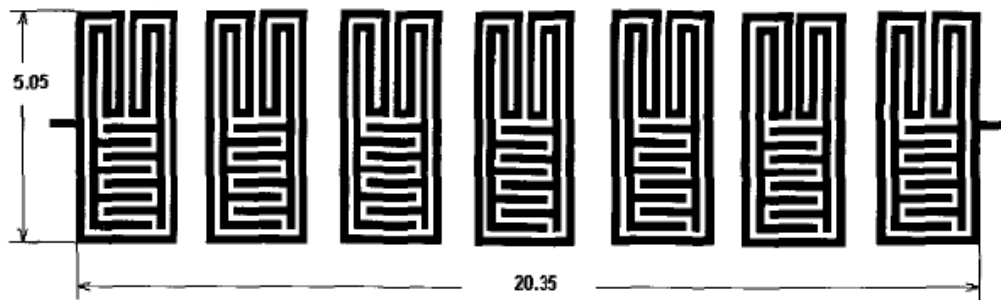
$$Z_s = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \quad (1.20)$$

$$\gamma = \sqrt{\omega\mu\sigma_2} \left(1 + j \frac{\sigma_1}{2\sigma_2} \right) = \alpha + j\beta \quad (1.21)$$

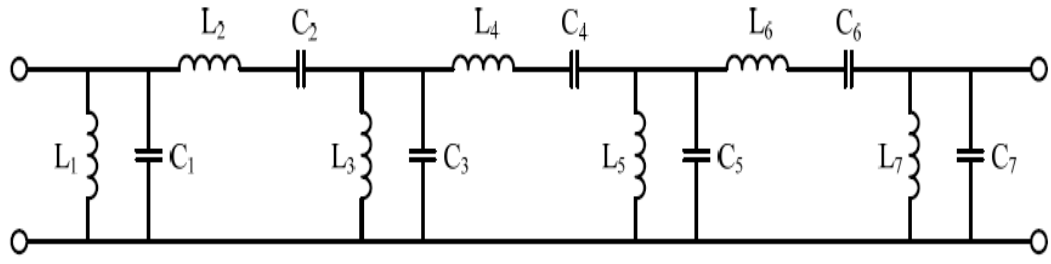
$$Z_s = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma_2} \left(\frac{\sigma_1}{2\sigma_2} + j \right)} = R_s + jX_s \quad (1.22)$$

Çizelge 1.1. Süperiletken ile iyi iletkenin karşılaştırılması

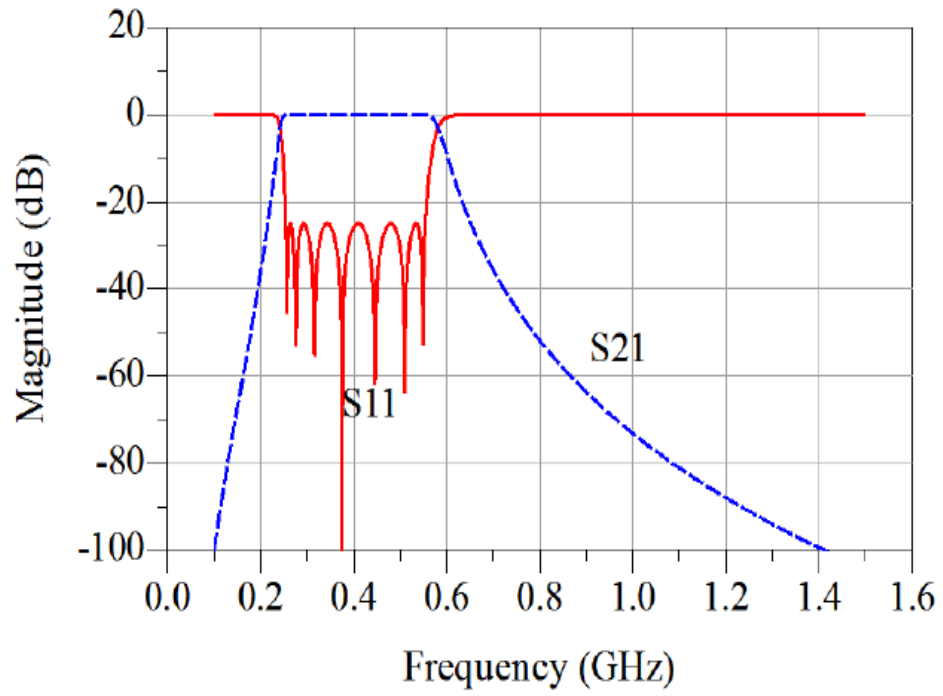
Parametreler	Süperiletken	İyi iletken
İletkenlik	$\alpha = \sqrt{\omega\mu\sigma_2}$	$\alpha_{normal} = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma_n}{2}}$
Nüfuz derinliği	$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\omega\mu\sigma_2}}$	$\delta_{normal} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma_n}}$
Yayılma hızı	$c = \sqrt{\frac{4\omega\sigma_2}{\mu\sigma_1^2}} = \frac{2}{\lambda\mu\sigma_1}$	$c_{normal} = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma_n}}$
Yüzey direnci	$R_s = \frac{\omega^2\mu^2\sigma_1\lambda^3}{2}$	$R_{s\ normal} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma_n}}$
Yüzey reaktansı	$X_s = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma_2}}$	$X_{s\ normal} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma_n}}$



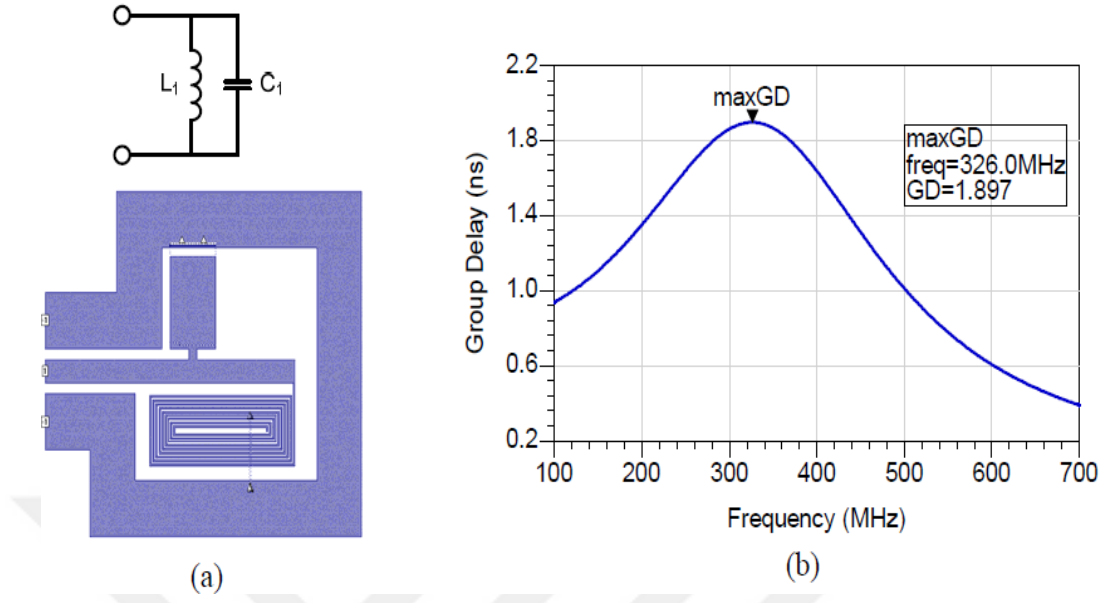
Şekil 1.29. 7 kutuplu yüksek sıcaklık süperiletken bant geçiren filtre



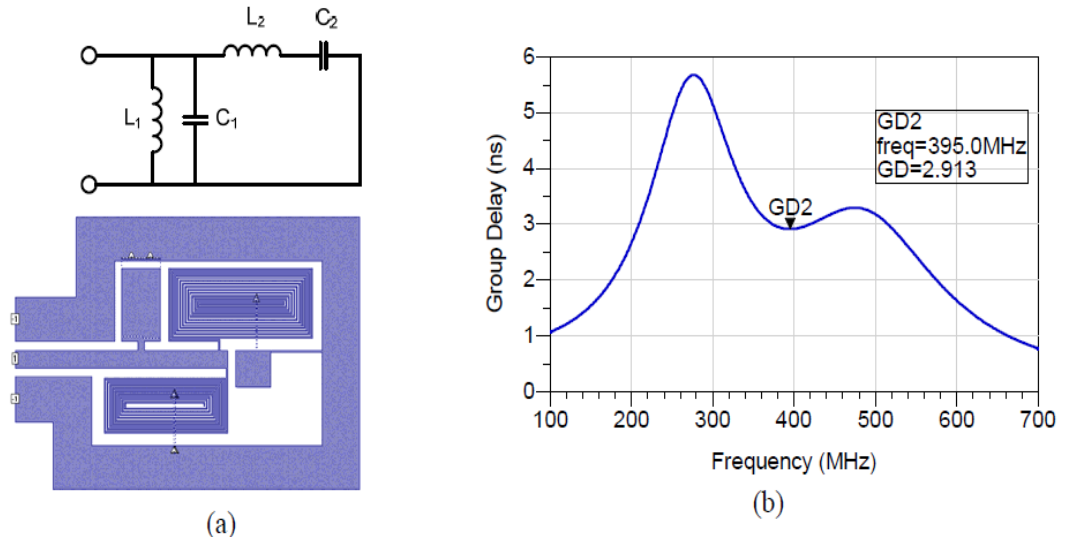
Şekil 1.30. 7 elemanlı bant geçiren filtre devre modeli



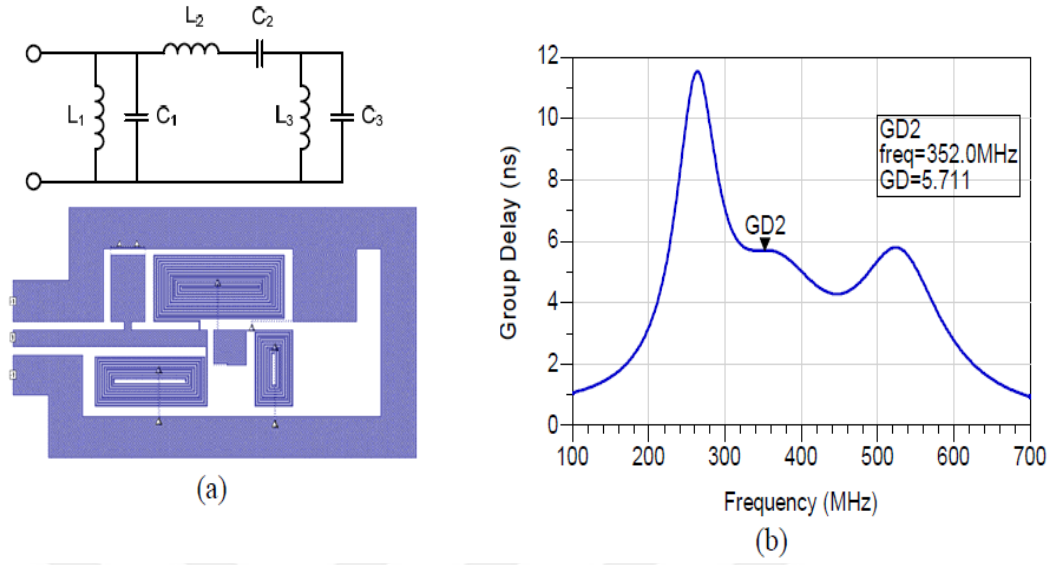
Şekil 1.31. 7 kutuplu bant geçiren filtre simülasyonu



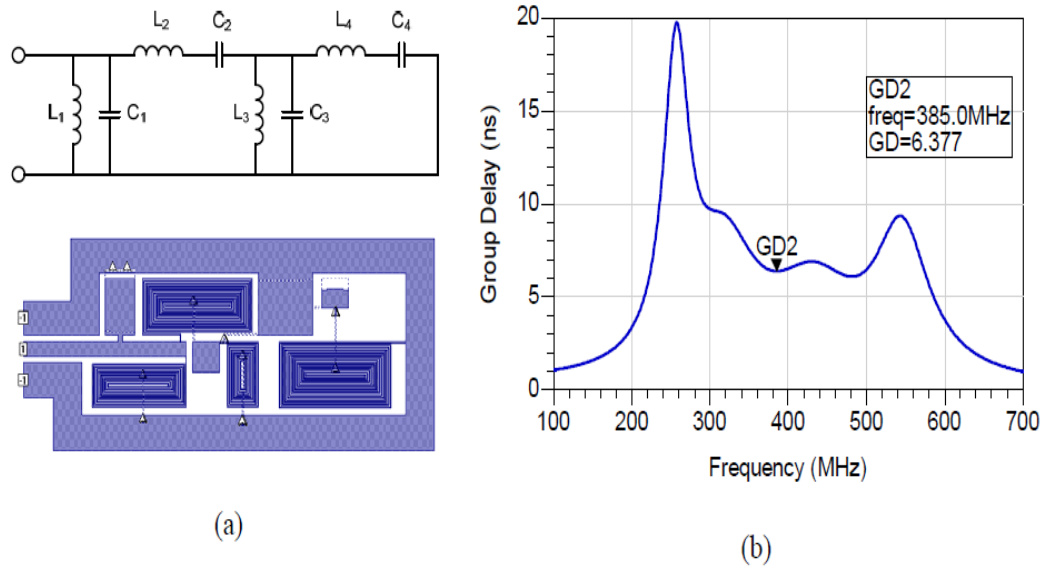
Şekil 1.32. a) Tek rezonatör yerleşimi b) Tek rezonatör için grup gecikme eğrisi



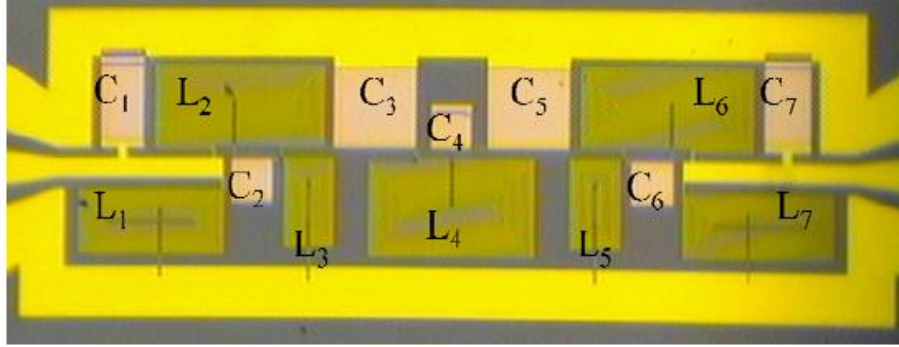
Şekil 1.33. a) İki rezonatör yerleşimi b) İki rezonatör için grup gecikme eğrisi



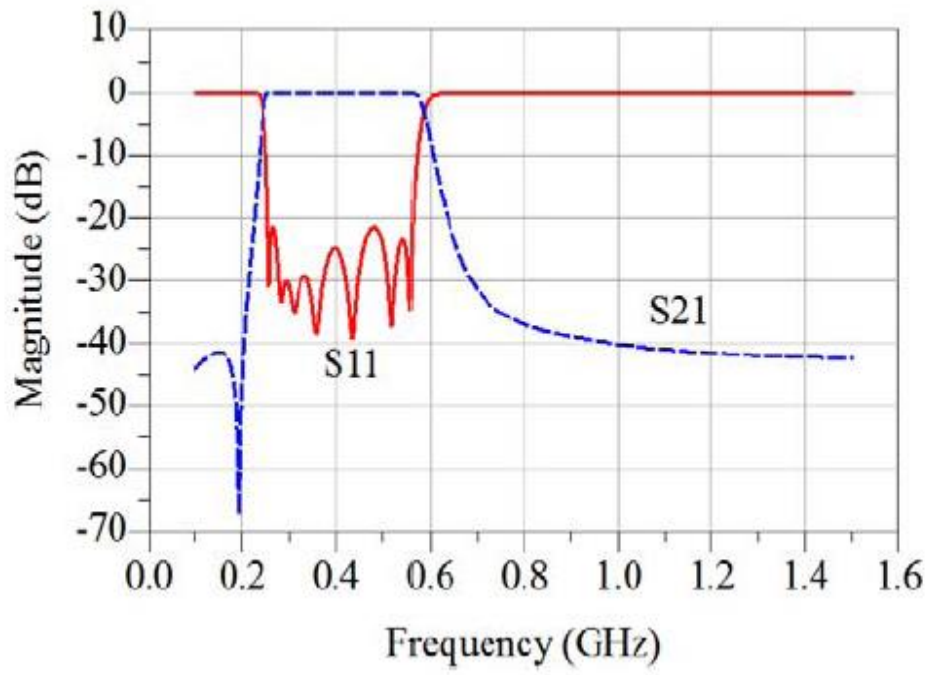
Şekil 1.34. a) Üç rezonatör yerleşimi b) Üç rezonatör için grup gecikme eğrisi



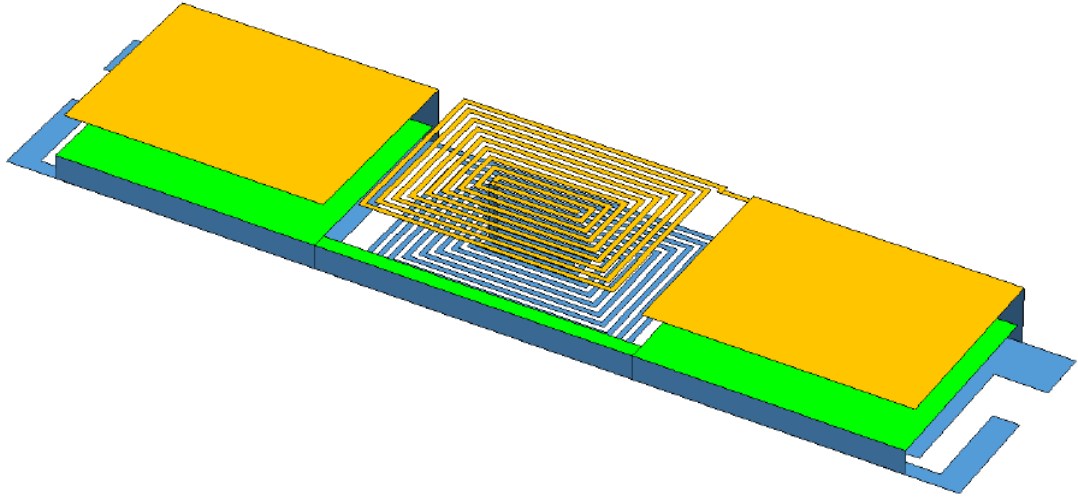
Şekil 1.35. a) Dört rezonatör yerleşimi b) Dört rezonatör için grup gecikme eğrisi



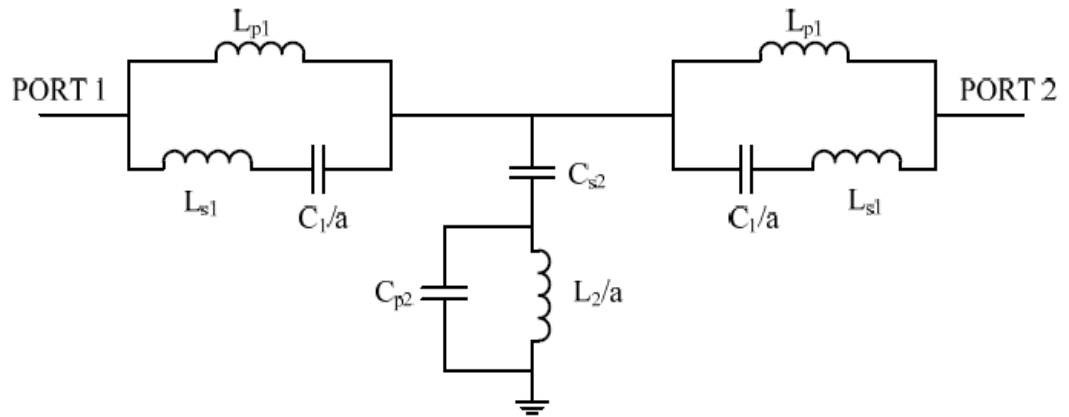
Şekil 1.36. 7 kutuplu olarak üretilmiş bant geçiren filtre resmi



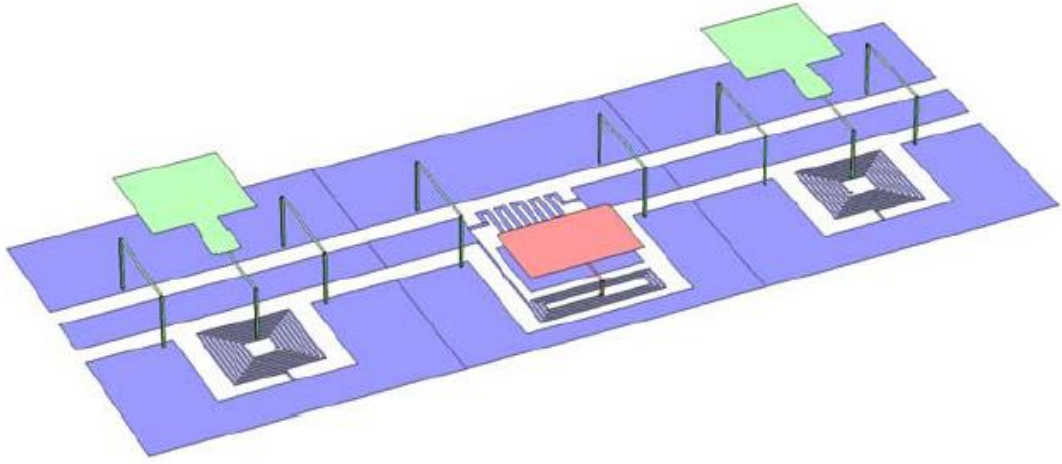
Şekil 1.37. 8 kutuplu bant geçiren filtre simülasyonu



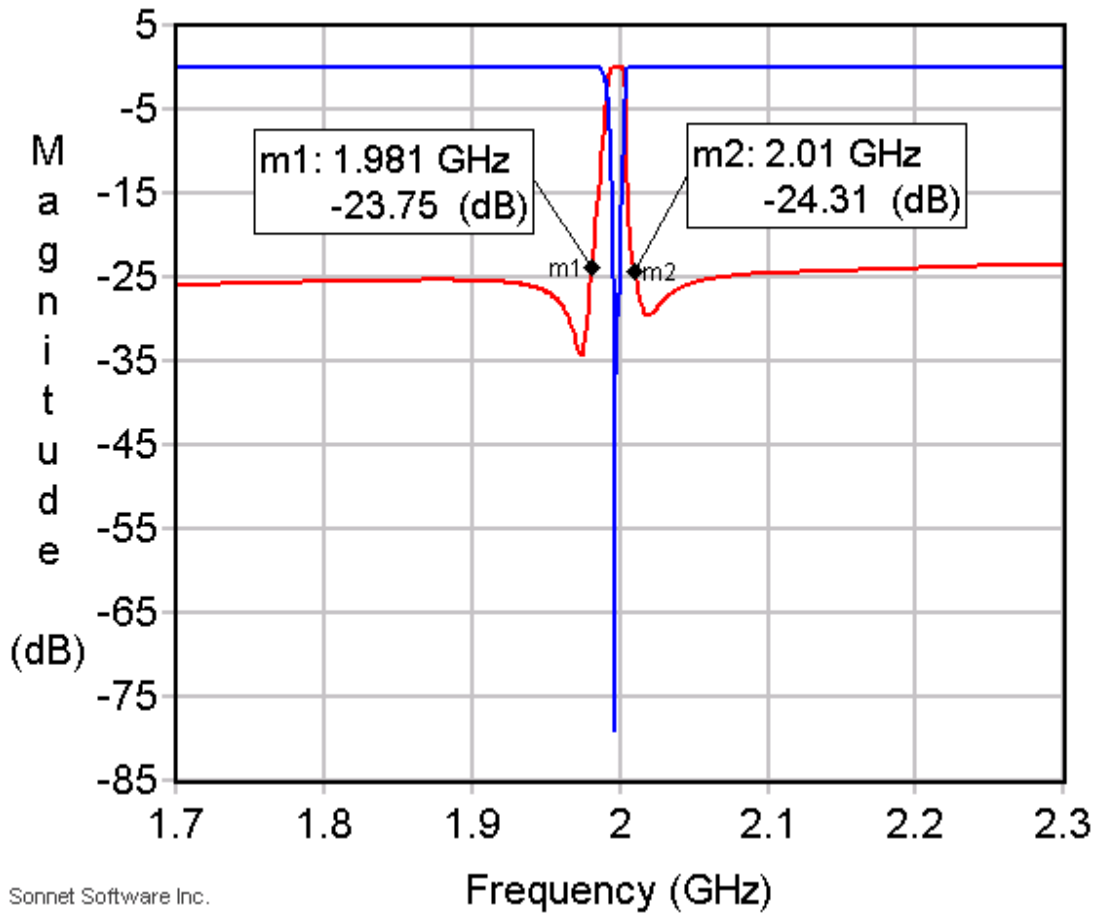
Şekil 1.38. 3 Kutuplu alçak geçiren filtrenin 3 boyutlu modellemesi



Şekil 1.39. 3 kutuplu bant durduran filtrenin devre modellemesi

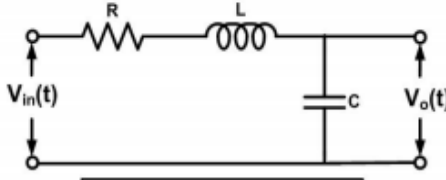
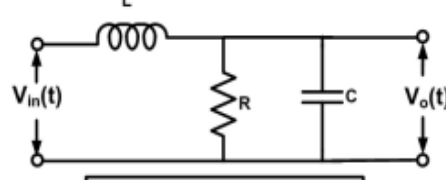
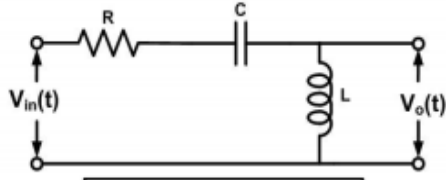
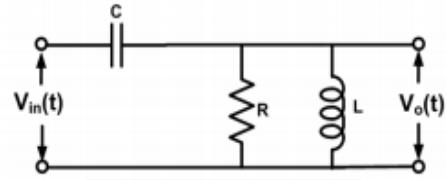
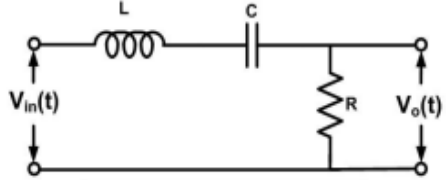
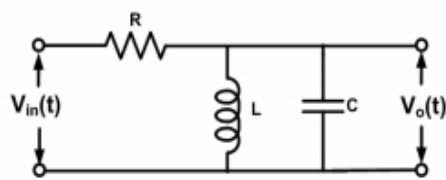
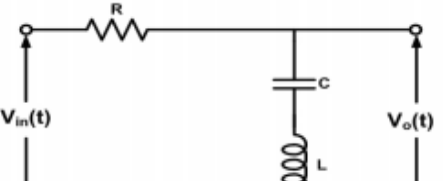
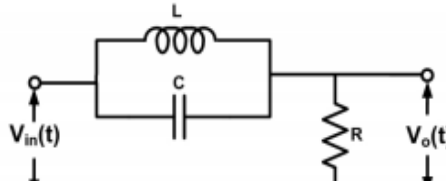


Şekil 1.40. 3 kutuplu bant durduran filtrenin 3 boyutlu modellemesi



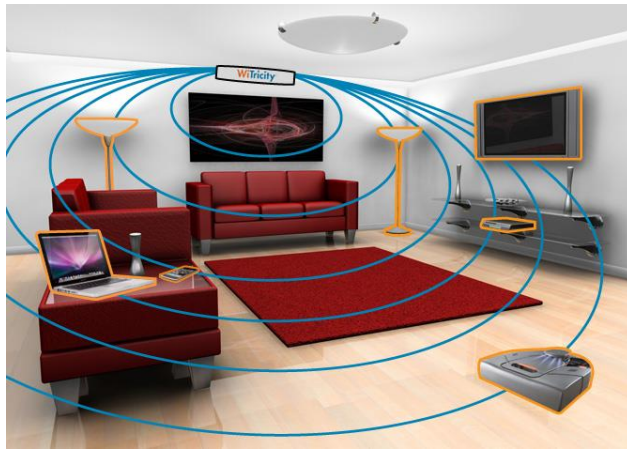
Şekil 1.41. 3 kutuplu bant durduran filtrenin simülasyon sonucu

Çizelge 1.2. Pasif filtre çeşitleri ve transfer fonksiyonları

	Seri	Paralel
AGF	 $G(s) = \frac{1/L \cdot C}{s^2 + s \cdot R/L + 1/L \cdot C}$	 $G(s) = \frac{1/L \cdot C}{s^2 + s \cdot 1/R \cdot C + 1/L \cdot C}$
YGF	 $G(s) = \frac{s^2}{s^2 + s \cdot R/L + 1/L \cdot C}$	 $G(s) = \frac{s^2}{s^2 + s \cdot 1/R \cdot C + 1/L \cdot C}$
BGF	 $G(s) = \frac{s \cdot R/L}{s^2 + s \cdot R/L + 1/L \cdot C}$	 $G(s) = \frac{s \cdot 1/R \cdot C}{s^2 + s \cdot 1/R \cdot C + 1/L \cdot C}$
BDF	 $G(s) = \frac{s^2 + 1/L \cdot C}{s^2 + s \cdot R/L + 1/L \cdot C}$	 $G(s) = \frac{s^2 + 1/L \cdot C}{s^2 + s \cdot 1/R \cdot C + 1/L \cdot C}$

1.9.4. Kablosuz elektrik iletiminde rezonatörler

Nicola Tesla elektrik enerjisini kablo kullanmadan bir yerden başka bir yere taşımıştır. Günlük hayatta kullanılan elektrikli cihazlarda milimetrik mesafelerde kablosuz elektrik iletimi gerçekleşmektedir. Kablosuz elektrik iletimi transformatörler ile gerçekleştirilmektedir. İki veya daha fazla bobin bulunduran transformatörlerde manyetik akı sayesinde enerji aktarımı sağlanır. Kablosuz elektrik enerji iletimi esnasında ortamda bulunan canlılara zarar verme ihtimali yüksek olduğundan ve enerji veriminin düşük olmasından dolayı günlük hayatta yer bulamamıştır. MIT Üniversitesindeki bir grup bilim insanı 60 Watt gücündeki lambayı kablo kullanmadan 2 metre mesafeden yakmayı başardılar. MIT Üniversitesindeki bir grup bilim adamı transformatörlerdeki çalışma prensibinden esinlendiler. Giriş ve çıkış sargı kullanmak yerine giriş ve çıkış rezonatörü kullandılar. Rezonatör belirli bir frekans değerinde titreşen ve rezonans yapan elektrikselsel aygıttır. Rezonatör belirli frekans değerlerindeki dalgaları iletmeye ya da güçlendirmeye yarar. Rezonatörlerde ortamda bulunan canlılara zarar vermeyecek değerde çalışma frekansı kullanımı var. 2.5 cm uzaklıktan 2 m uzaklığa kadar çeşitli mesafelerde kablosuz elektrik iletimi ile lamba yakmayı başardılar. Rezonatör sisteminin veriminin yüksek olduğunu ve günlük hayatta kullanımını ispatladılar.



Şekil 1.42. Rezonatör ile kablosuz elektrik iletimi

1.10. Süperiletkenliğin Diğer Uygulama Alanları

1.10.1 Maglev trenleri (Uçan trenler)

Manyetizma sonucu havada asılı kalma anlamına gelen Maglev terimi manyetik levitasyon'un kısaltmasıdır. Maglev trenlerindeki çalışma, prensibi süperiletken maddenin manyetik alanı dışlaması sonucudur. Rayları süperiletken malzemeden yapıp ray hattı boyunca soğutma işlemi yapmak mantıklı olmamasından dolayı süperiletken malzeme trenin alt kısmına yerleştiriliyor. Sürtünme olmadığından dolayı tren havada asılı kalarak rahat bir şekilde yol alıyor.

Filmlerde kullanılan maglev trenleri, süperiletkenliğin meşhur olmasını sağladı. Japonya'daki Yamanishi maglev treni saatte 581 km hızla yol almaktadır. Fransa'da bulunan dünyanın en hızlı treninden 6 km daha hızlıdır.

Japonya'da üretilen süperiletken Maglev trenleri, özel bir ray üzerinde, aracın her iki ucunda bulunan soğutma sistemli süperiletken mıknatıslar aracılığı ile yükseltilmektedir. Maglev treni hareket ettiği zaman rayda bulunan iletken malzemelere verilen elektrik akımı sonucu itme gücü oluşmaktadır. Maglev treni 100 km/h hızını geçtiği zaman, tekerlekleri içine katlanmaktadır ve hat üstünde yükselmektedir. Maglev treni, sürtünmesiz ortamda uçmaktadır. Mıknatısların ısınması, soğutma sistemi ile soğutulmaktadır. Maglev trenini durdurmak için akımın yönü tersine çevrilmektedir. Uçan maglev treni bu defa zıt yönde kuvvet ile durdurulmaktadır.



Şekil 1.43. Maglev treni

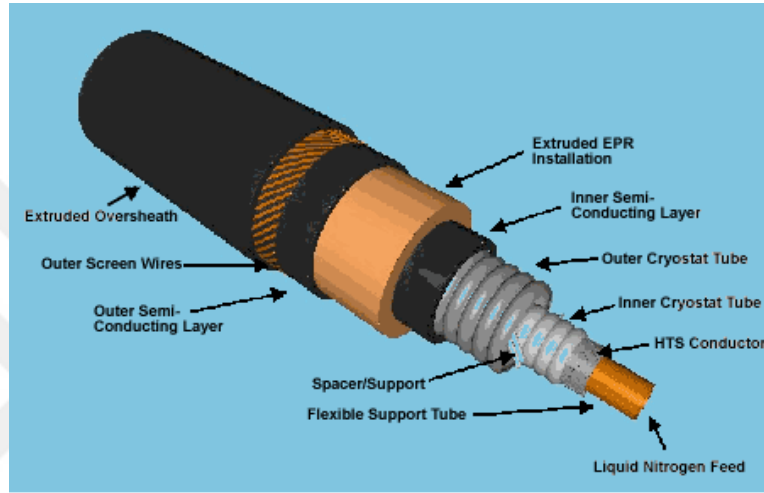
Günümüzde kritik sıcaklık değerleri, bilinenlerden daha yüksek süperiletken maddeler bulundukça süperiletken maddelerin yeni uygulama alanları ortaya çıkacaktır. Oda sıcaklığı değerine sahip süperiletken maddeler bulunduğu teknolojik devrim olacağı öngörülmektedir.

1.10.2. İletim hatları

Elektrik akımının iletimi için bakır tel malzeme kullanımında kilometre başına yaklaşık 50 kW değerinde güç kaybı olmaktadır. Süperiletken malzeme kullanımında kilometre başına güç kaybımız 30 kW değerine kadar düşebilmektedir. Süperiletken madde üzerinden doğru akım geçtiğinde güç kaybı olmamaktadır. Süperiletken kablo bakır kablonun ağırlığının onda biri değerinde olduğundan dolayı taşınması oldukça kolaydır.

Niyobiyum (Nb) alaşımları, YBaCuO (YBCO) gibi II. Tip süperiletken maddeler taşıyacağı akım miktarı daha çok olduğundan dolayı elektrik iletiminde çok daha kullanışlıdır. Çok ince niyobiyum titanyum teller demet halinde bakır tüp içerisine yerleştirilmektedir. Telin dış kısmı yalıtkan malzeme ile kaplanmaktadır. Soğutma amacıyla kullanılan sıvı azot, tüpün etrafından akıyor. Soğutma sistemi bozulup malzemenin süperiletkenlik özelliği bozulsan bile iletim bakır tüp aracılığıyla devam etmektedir.

YBCO malzeme sert olmasına karşın kırılkanlık özelliğinden dolayı YBCO teller önce özel tasarımı film şeritler üzerine yerleştirilmektedir. Soğutma işleminde aynı şekilde sıvı azot kullanılmaktadır. Yaygın iletim hattından süperiletken iletim hattına geçişi yapan ve süperiletken iletim hattına sahip olan ülke bulunmamaktadır. Geçiş sağlayabilmek için büyük projelerle sistemli olarak gerçekleştirileceği öngörülmektedir.



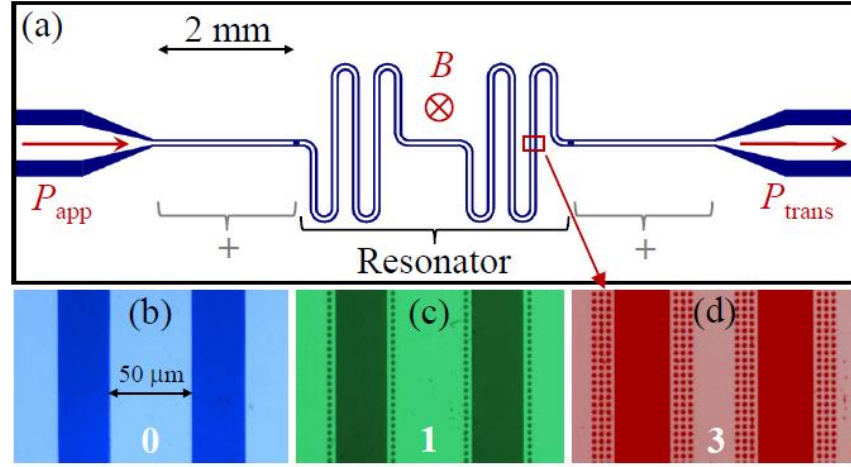
Şekil 1.44. Yapısında süperiletken malzeme bulunduran kablo

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Dikey manyetik alanlardaki süperiletken düzlemsel dalga kılavuzu kavitesi operasyonu, kuantum elektrodinamik devreleri ve kinetik endüktans detektörleri için kullandığı gibi, enerji dağıtan Abrikosov vorteksler nedeniyle genellikle cihaz performansında düşüşe yol açar. Nb rezonatörlerinde vorteks kaynaklı enerji kayıpları, mikro desenli pimleme bölgelerinin (antidotlar) farklı uzaysal dağılımları ile birlikte 4.2°K değerinde transmisyon spektroskopisi ölçümleri yoluyla incelemeler yapıldı. Antidotları olmayan rezonatörlerin aksine, vorteks kaynaklı kayıplarda belirgin bir düşüş oldu. Dolayısıyla makul alanlarda geniş bir frekans aralığı ve uygulanan güç üzerinde kalite faktörlerinin arttığı saptandı.

Son yıllarda süperiletken mikrodalga devre cihazlarının önemi sürekli olarak artmaktadır. Özellikle, düzlemsel mikrodalga rezonatörleri oldukça popüler hale gelmiştir. Mikrodalga rezonatörler kuantum elektrodinamik devre, kuantum bilgi işlem gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca bu entegre sistemler kuantum bilgi süreci için uygun adaylar gibi görünmektedir. Düşük enerji kayıpları, yani yüksek kalite faktörleri, bu rezonatörler için temel bir ihtiyaçtır.

Manyetik alanlarda süperiletken rezonatör yapma, Abrikosov vorteks hareketi yüzünden büyük ölçüde enerji dağılımına ve buna bağlı olarak daha düşük kalite faktörlerine neden olur. Son zamanlarda, bu problemi gidermek için özel deneysel koşullar altında bazı yaklaşımlarda bulunuldu. Deneysel olarak uygunsa, manyetik alan paralel şekilde ince filme uygulanabilir. Vorteks yüzünden oluşan enerji kayıpları, vortekslerin oyuk desenli bir rezonatör içinde tutulması ile azaltılabilir. Buna rağmen, süperiletken çipe dik önemli bir bileşeni olan manyetik alanlar için bu yaklaşımlar yeterli olmayacaktır.

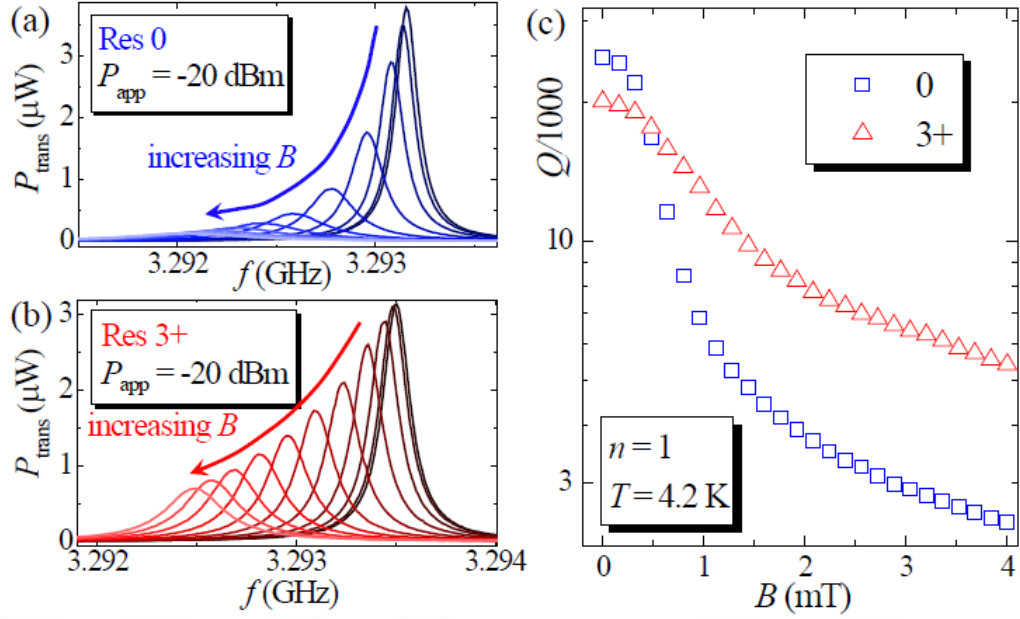


Şekil 2.1. Rezonatör modelleri

Çip üzerindeki ultra soğuk atom bulutlarını ya da düzlemsel Penning kapanındaki elektronları tutmak için istenildiği gibi dikey manyetik alanlarda süperiletken rezonatörlerindeki mikrodalga kayıplarında belirgin düzeyde azalmasını sağlayan bir metodun deneysel incelemesi yapıldı. Abrikosov vorteksleri için iyi bilinen ve yüksek derecede kontrol edilebilir pimleme bölgeleri sağlamak amacıyla süperiletken filmde stratejik olarak yerleştirilmiş mikro desenli oyuklar (antidotlar) kullanıldı. Ayrıca sunulan sonuçlar, dış manyetik alanlarda operasyon yapıldığında, kinetik endüktans detektörleri, mikserler ve filtreler gibi diğer süperiletken mikrodalga ince film cihazlarına transfer edilebilmektedir.

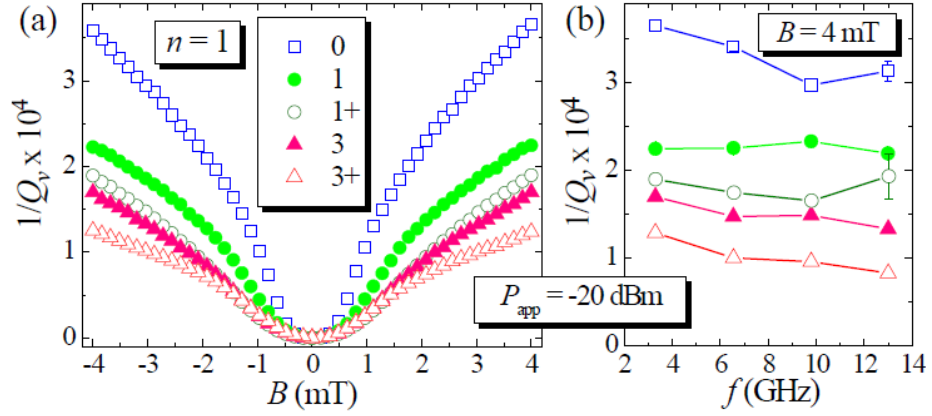
3,3 GHz rezonans frekanslı, her iki uçta 70 μm genişliğinde boşluklar yoluyla kapasitif ve simetrik olarak besleme hatlarına bağlanmış yarım dalga boyu transmisyon hattı rezonatörleri üretildi. Şekil 2.1(a)'da bu rezonatör modelinin bir çizimi gösterilmektedir. Salınlımlı süper akımların yoğunlukla rezonatörlerin kenarlarında akması beklendiğinden burada bulunan Abrikosov vorteksler, kenarlarda bulunan vortekslerden daha büyük bir itici güce maruz kalacaktır ve dolayısıyla kayıpları artıracaktır. Ayrıca, B manyetik alanı süperiletken durumdaki rezonatörlere uygulanırsa, bu çalışmada olduğu gibi, vorteks yoğunluğu akı girişinin olduğu kenarlarda daha yüksek olacaktır. Bu nedenle, antidotları merkez kondüktörün kenarlarına ve (rezonatör tipi) **0**, **1** ve **3** olarak ifade edilen sıfır (referans örneği), bir ve üç sırasında yatay düzleme yerleştirildi.

Antidotlar $d = 2 \mu\text{m}$ çapına ve dizayn parametresi olarak $a = 4 \mu\text{m}$ antidot-antidot mesafesine sahiptir. Besleme hatlarındaki vorteksler genel kayıpları artırmaktadır ve Q kalite faktörünü azaltmaktadır.

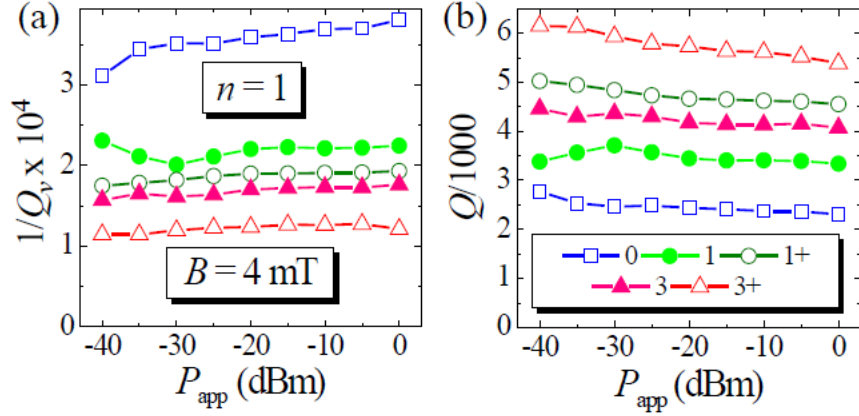


Şekil 2.2. Sabit uygulanan güç (P_{app}) için rezonatör eğrisi

Rezonatör **0** (mavi kareler) ve rezonatör **3+** (kırmızı üçgenler) için Şekil 2 (c) de kalite faktörü $Q(B) = f_{\text{res}}(B) / \Delta f(B)$ hesaplandı. $B=0$ 'da antidotları olmayan rezonatörler daha yüksek $Q(0)$ 'a sahiptir. Buna rağmen, $B \geq 0.5 \text{ mT}$ için rezonatör **3+**'nın kalite faktörü, $B = 4 \text{ mT}$ de yaklaşık 2.5 faktöre kadar rezonatör **0**'ın $Q(B)$ seviyesini belirgin şekilde aşmıştır. Bu artışın nedeni vortekslerin antidotlar tarafından etkili tutulmasına ve pimlenmesine bağlanmaktadır.

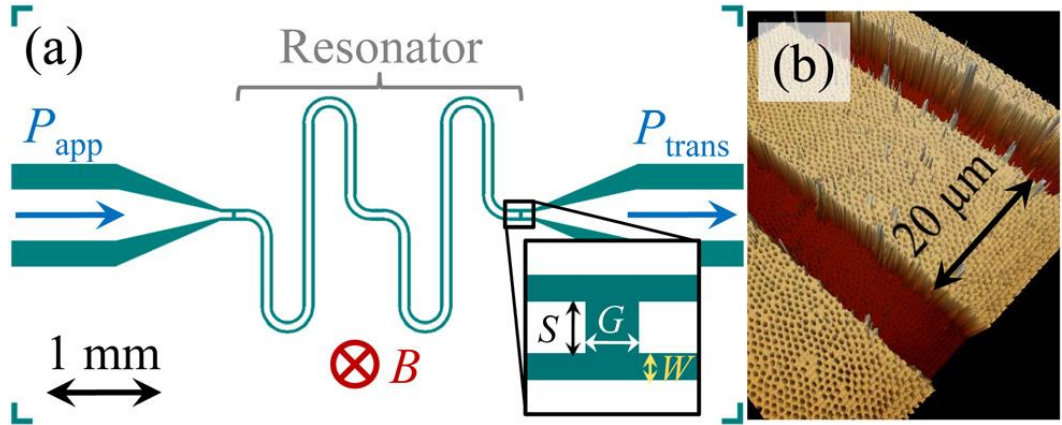


Şekil 2.3. Beş farklı rezonatörün vorteks bağlantılı enerji kayıpları

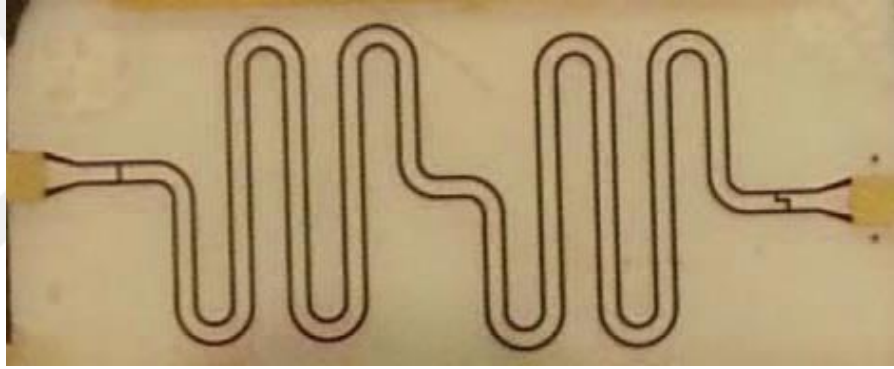


Şekil 2.4. Beş farklı rezonatör için (a) $1/Q_v(P_{app})$ (b) $Q(P_{app})$

Süperiletken mikrodalga rezonatörlerdeki Abrikosov vortekslerin varlığından kaynaklı enerji kayıplarının antidotların girişiyle belirgin derecede azaltılabileceğini deneysel olarak ispatlandı. Bu doğrultuda, mT aralığındaki sonlu uygulanan alanlarda $Q(B)$ kalite faktörü, bu metotla büyük ölçüde artırılabilir. Frekans aralığı $3.3\text{GHz} \leq f \leq 13\text{GHz}$ olmak üzere geniş tutularak ve uygulanan gücün dört büyüklük sırasını $T=4.2^\circ\text{K}$ sıcaklıkta $-40\text{dBm} \leq P_{app} \leq 0\text{dBm}$ alınarak ispatlandı.



Şekil 2.5. Rezonatör tasarımı

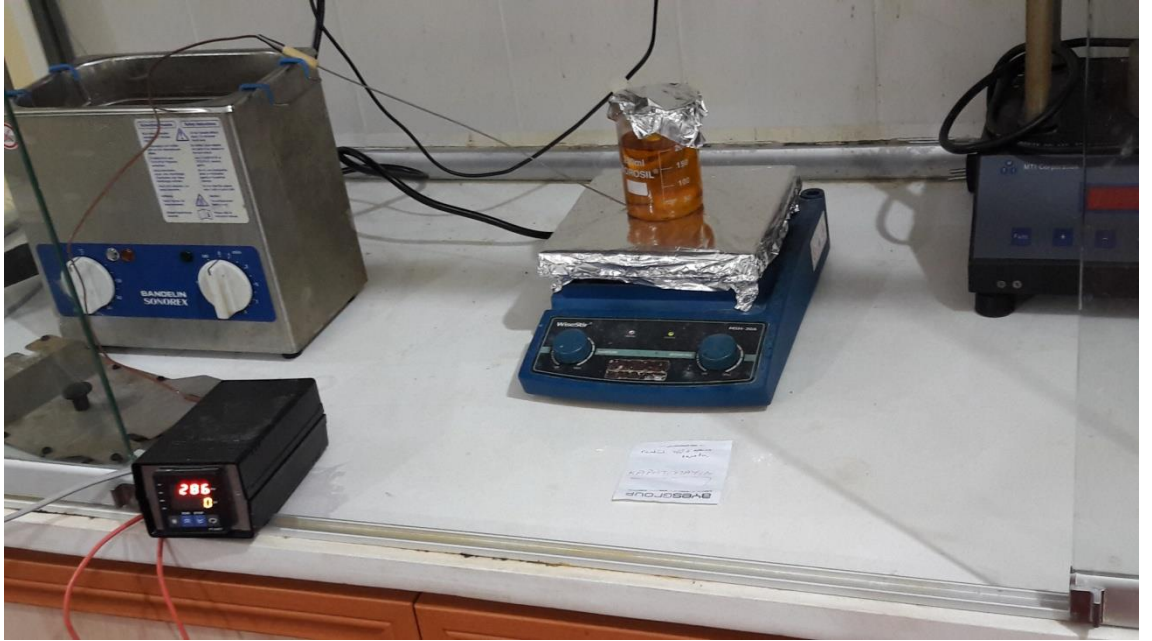


Şekil 2.6. YBCO malzemeden üretilmiş rezonatör örneği

3. MATERYAL ve YÖNTEM

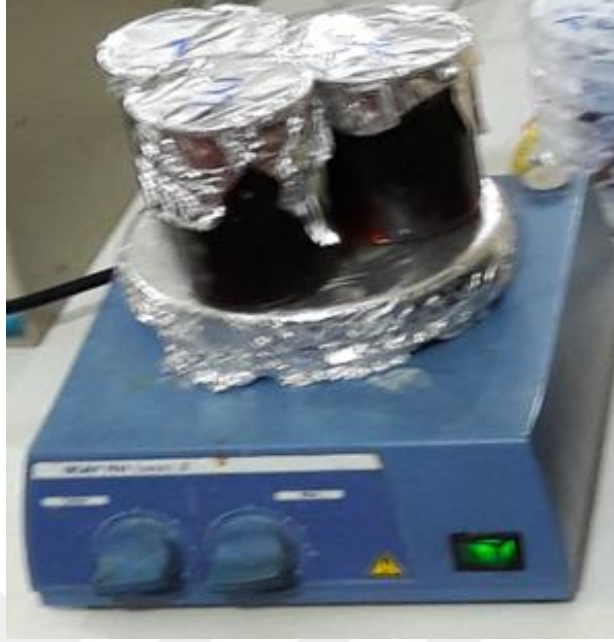
3.1. YBCO Malzeme Hazırlanması

Bezir yağı 2 ile 3 gün arası 200° - 300° arasında kaynatıldı. İçerisine homojen karışım olması için manyetik balık kullanıldı. Analog ısıtıcı kullanıldığından sıcaklık değerlerinin 200° ile 300° arasında olması için sıcaklık değerleri sıcaklık ölçer ile kontrol edildi.

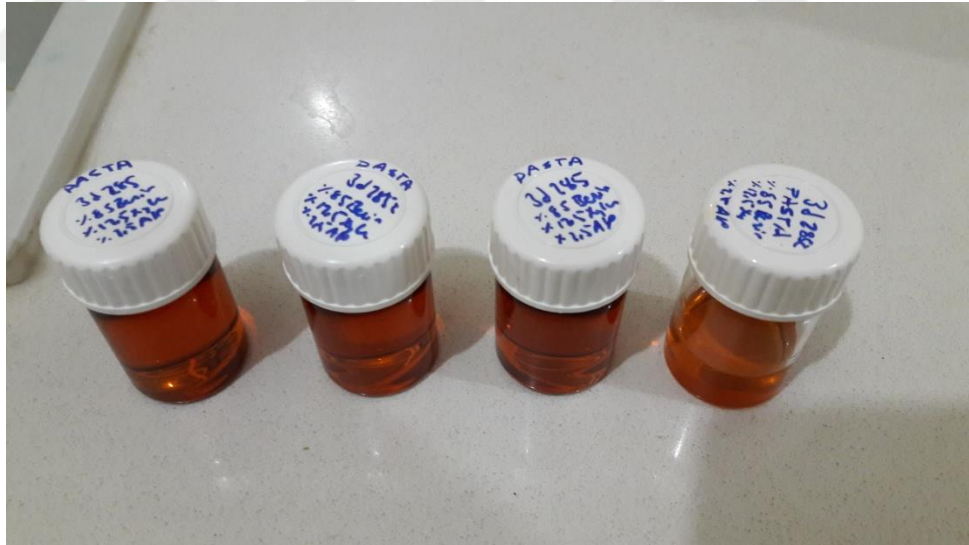


Şekil 3.1. Bezir yağının kaynatılması

Kaynatılan Bezir yağının %85'i, %12.5 Xylene ve %2.5 Alpha Terpinol 12 ile 24 saat arası cam kabın içerisinde manyetik balık ile karıştırıldı.

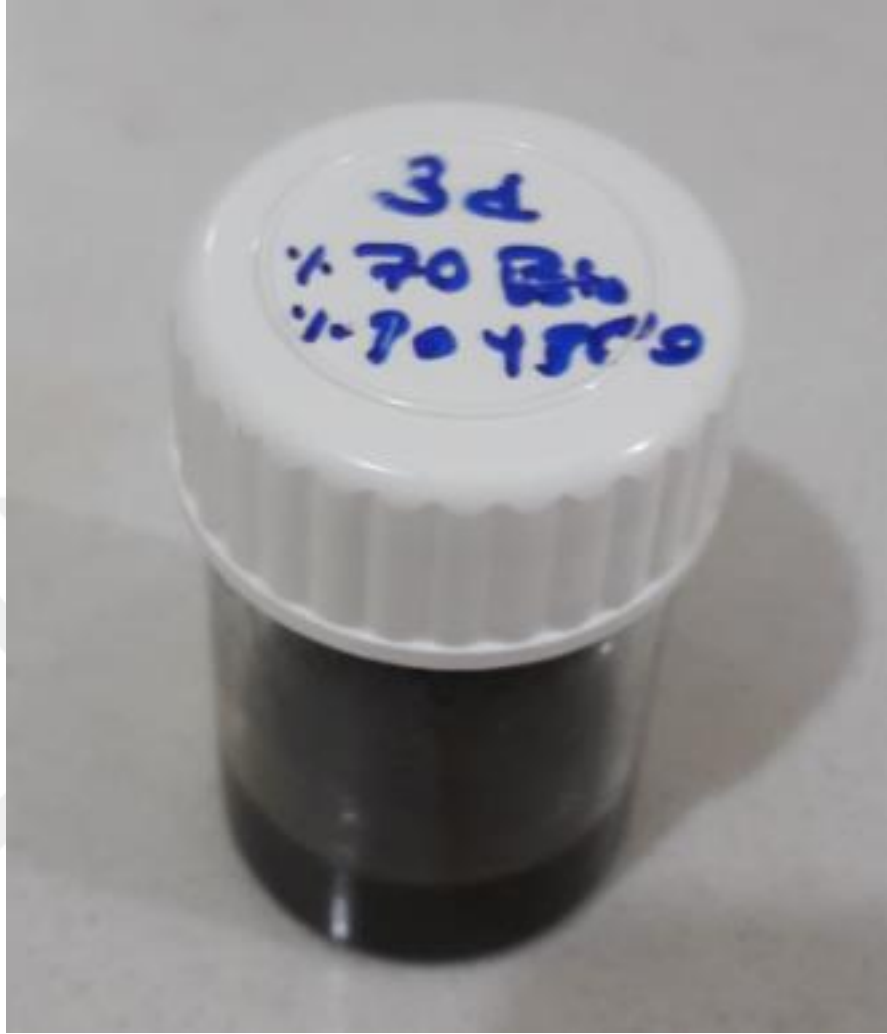


Şekil 3.2. Bezir yağı-Xylene-Alpha Terpinol karışımının ısıtılması



Şekil 3.3. Bezir yağı-Xylene-Alpha Terpinol karışımı ile oluşan pasta

Bezir yağı – Xylene – Alpha Terpinol'den oluşan pastanın %70'i ile katı YBCO bileşiğinin %30'u manyetik balık kullanılarak karıştırıldı.



Şekil 3.4. Pasta-YBCO karışımı

3.2. Serigrafi (Screen Printing)

Şekil 3.5 serigrafi sistemini göstermektedir. İpek kumaş, sıkıca tutulan çerçeveye monte edilir. Sistem hem ipeği hem de alt katmanı hizada tutmak için her iki uçta da dikey düzleme ayarlanabilmektedir. Ayrıca ipeğin pozisyonunun ince ayarı, topuzlar kullanılarak yapılabilir. Serigrafi maddesi, ipeğin üst yüzeyine uygulanır ve esnek lastik sıkmaç, ipeğin bir ucundan diğerine geçirilir. Daha sonra kumaş, alt katman yüzeyi ile temas ettirilir. Karışım, ipek kumaşın açık alanları üzerinden geçirilir.



Şekil 3.5. Serigrafi sistemi

Esasen sıkmaç, fonksiyonu ipek vasıtasıyla alt katman üzerine aktarım yapan esnek bir maddedir. Sıkmaçlarını iki fonksiyonu vardır.

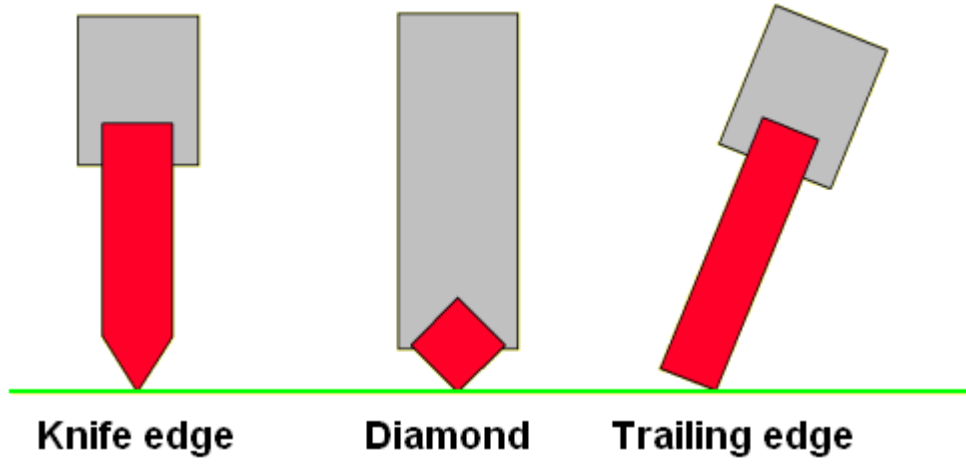
1. İpeği alt katman ile temasa zorlamak
2. Macunu şablon içine ve alt katman üzerine itmek

Pürüzlü bir yüzeye uygun olması için esnek bir sıkmaç gereklidir. İpek yüzeyi üzerinde kaydırıldığı için aşınmaya dayanıklı olması gerekmektedir. Çok geniş sertlik aralığı bulunmaktadır ancak genel olarak 60-80 Shore aralığındadır. Çok yumuşak sıkmaçlar pürüzlü yüzeyler için son derece uygundur ancak uygulanan basınç sonrası çökmede çok sert olanlar tam aksine davranış sergileyebilir. 65 Shore, genel kalın film serigrafisi için kullanılan en yaygın sertliktir, daha sert olanları, örneğin 75 Shore eğer yüksek sıkmaç basıncı gerekirse veya daha ince baskılar yapılacaksa kullanılır. Macunu şablon içinde itmek için ve onu ipeğin üst yüzeyinden kesmek amacıyla sıkmaç ucunda yaklaşık 45° açıyla kullanılır. Çok daha dik açılar, şablon dolumu için yetersizdir. Çok daha düşük açılar kontrolsüz itmeye ve bu nedenle daha zayıf kalınlığa neden olurlar.



Şekil 3.6. Serigrafide kullanılan sıkmaçlar

Sıkmaçlar farklı şekillere sahiptir. Yaygın olarak kullanılan iki şekil vardır; elmas kesim ve ağız kenar kesim, ayrıca nadiren bıçak kenar kesim de kullanılmaktadır (Şekil 3.7.). Firar kenar kesim sıkmaç, klasik serigrafide neredeyse herkes tarafından kullanılmaktadır. Kendiliğinden esnektir, böylece pürüzlü yüzeyler ile son derece uyumludur. Yüzeyin hem yükseltilerine hem de çukurlarına nispeten aynı basıncı uygular ve bu yüzden baskı kalınlığının en eşit halini sağlar. Elmas sıkmaç, sıkmaç ucunun pozisyonunun tam olarak kontrolünü sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Böyle bir kontrol, uç kısmın düz bir yüzeye taşınmasını ve böylece macunun alt katman üzerinde düz bir tabaka şeklinde yayılmasını sağlar.



Şekil 3.7. Sıkmaç çeşitleri

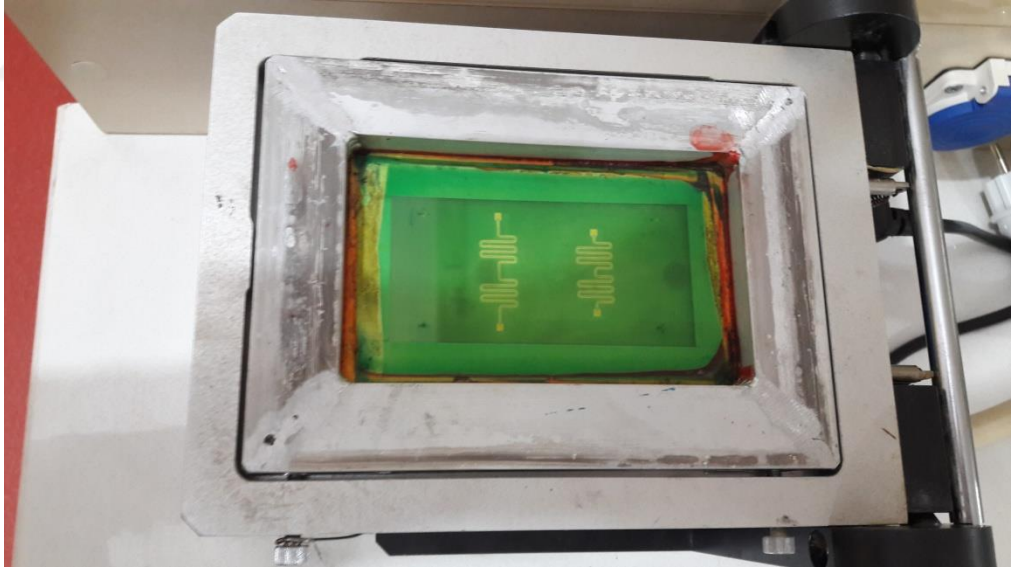


Şekil 3.8. Ürettiğimiz Rezonatörün alt tabakası Isolab Cam

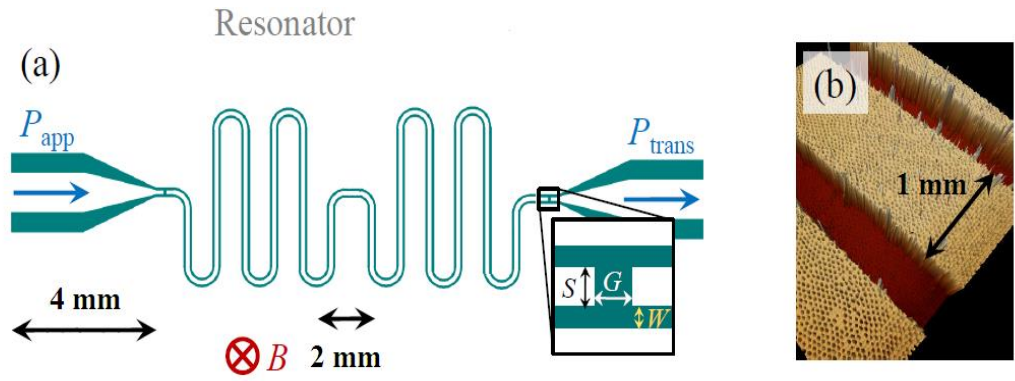
Cam üzerine yapılan baskı devre fırında 150° değerinde 10 dakika süre ile kurutulur. Daha sonra 300° değerinde 2 ile 3 saat arası fırında bekletilir.



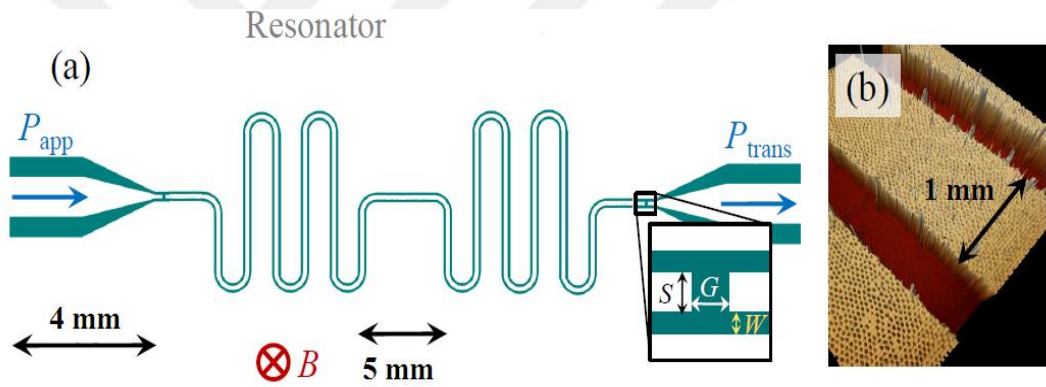
Şekil 3.9. Isıtma işlemi yapılan fırın



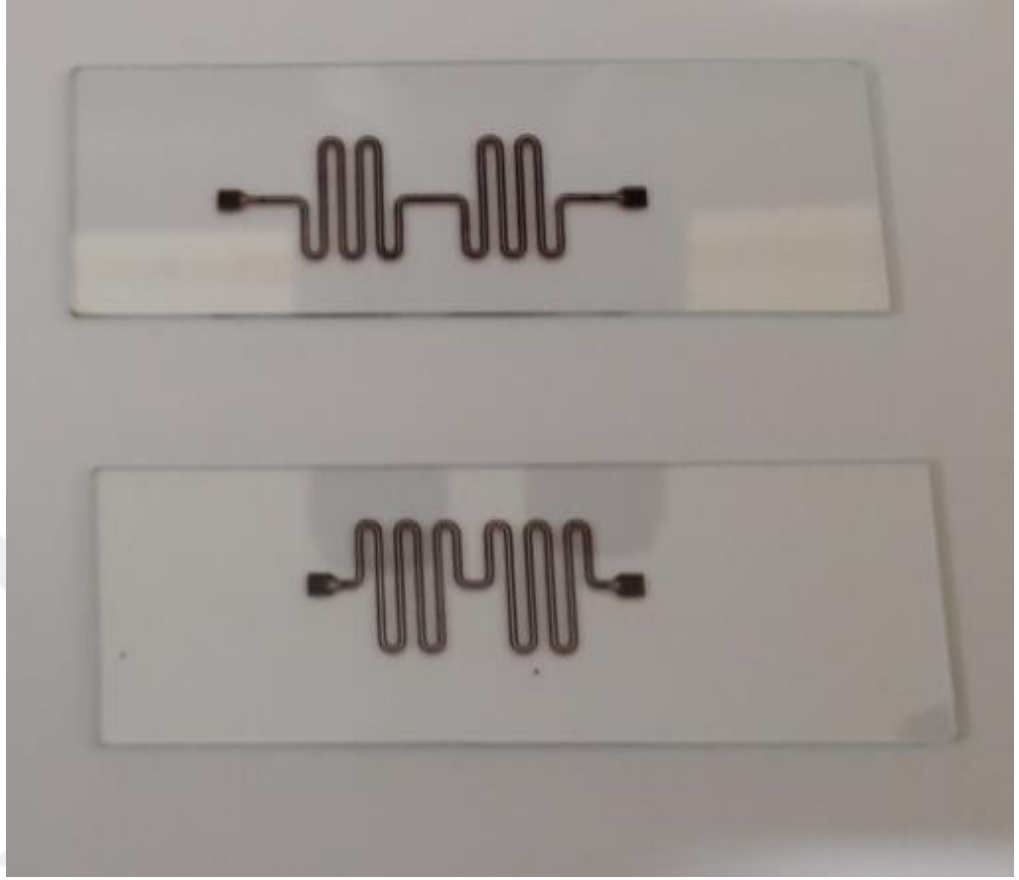
Şekil 3.10. YBCO Rezonatör üretiminde kullanılan maske



Şekil 3.11. Üretilen rezonatörün boyutu ($2 \times 3.5 \text{ cm}^2$ cam üzerine yapıldı)

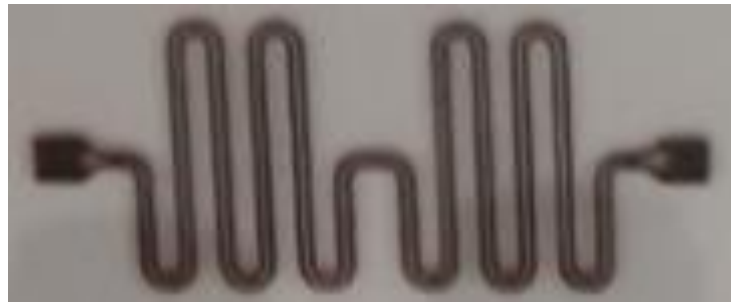


Şekil 3.12. Üretilen diğer rezonatörün boyutu ($2 \times 4.5 \text{ cm}^2$ cam üzerine yapıldı)

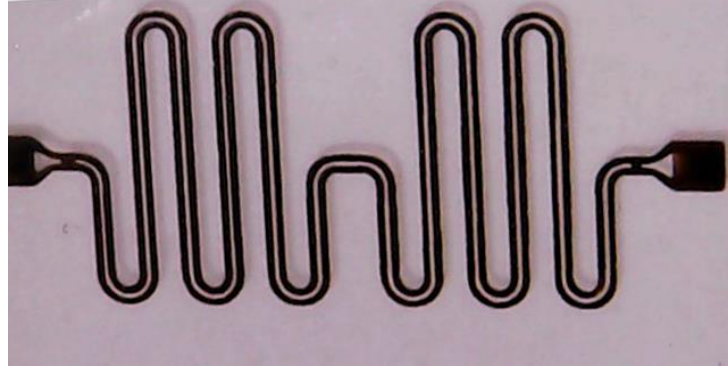


Şekil 3.13. Fırın işleminden sonra üretilen YBCO rezonatörler

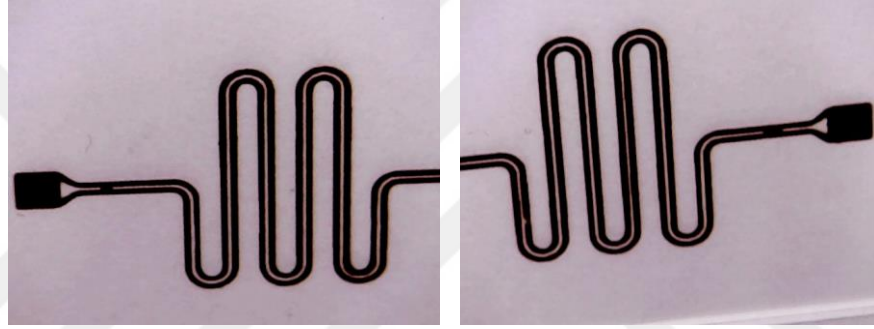
Üretilen rezonatörün sağ ve sol kısımlarındaki fazlalıklar alınır.



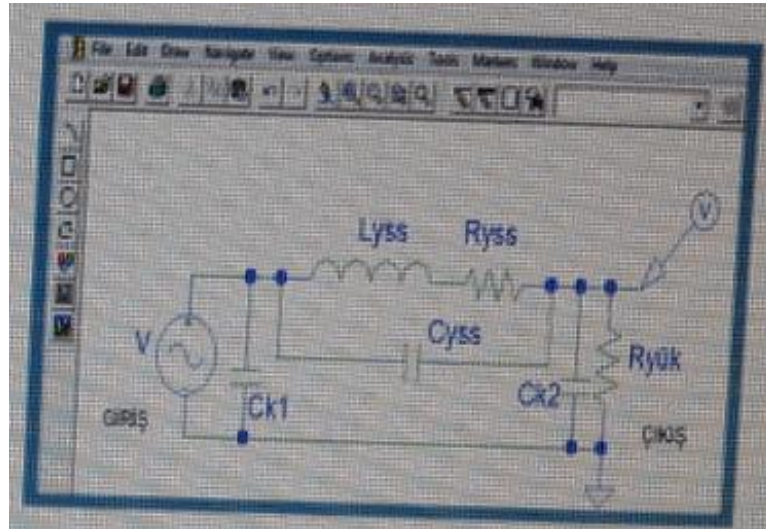
Şekil 3.14. Üretilen rezonatörlerin fazlalıkların alınmasından sonraki resmi



Şekil 3.15. YBCO rezonatörünün optik mikroskopi görüntüsü



Şekil 3.16. YBCO rezonatörünün optik mikroskopi görüntüsünün parçaları



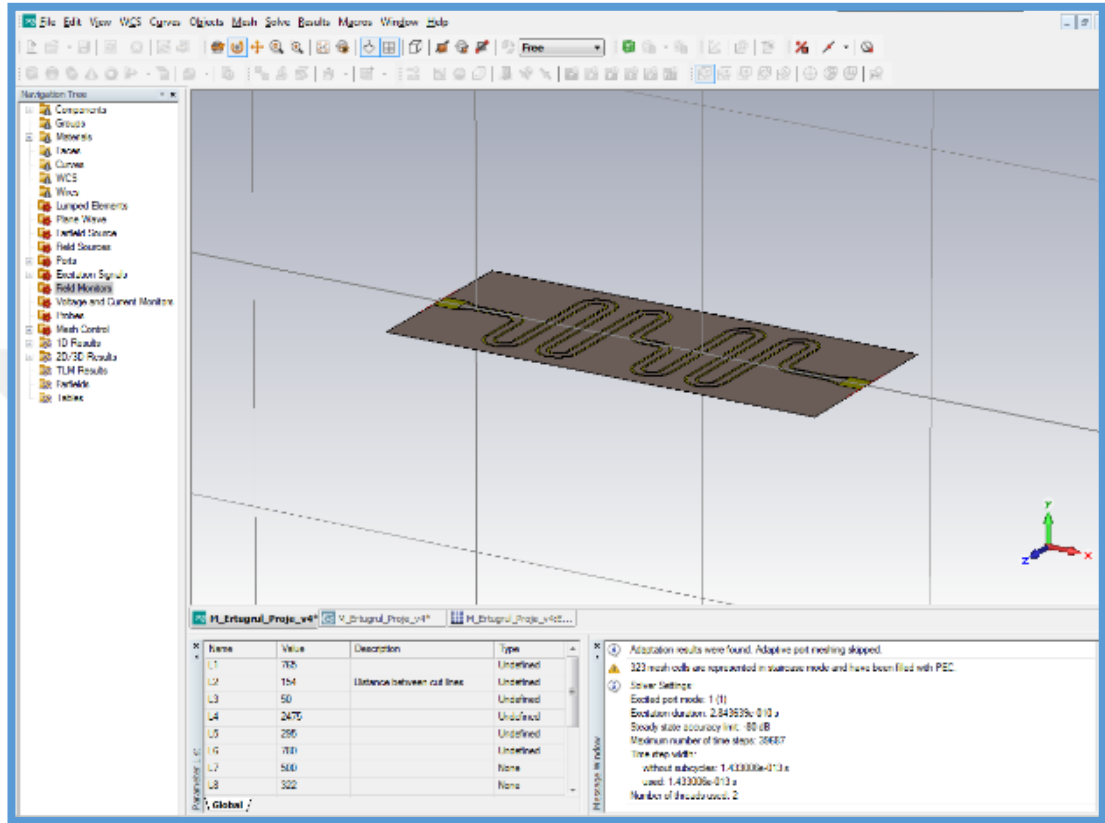
Şekil 3.17. YBCO rezonatörünün RLC eşleniği



Şekil 3.18. YBCO rezonatör ölçüm sistemi

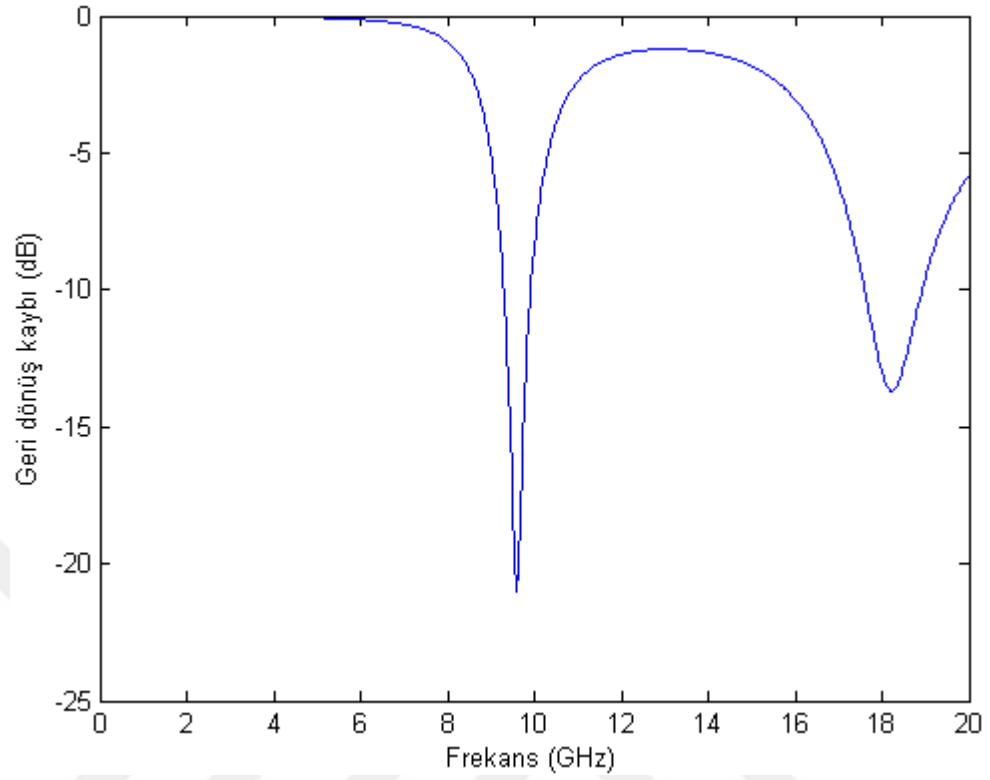
Sistemde ilk önce vakum testi yapıldı. Sisteme yapılan test sonucunda vakum tuttuğu gözlemlendi. Sistemin ısıya dayanıklılık testi yapıldı. Sistem vakum tutarken metal borunun uç kısmından sıvı azot dolumu yapıldı. Rezonatör sisteminin ısı yalıtımını olduğu görüldü. Numune tutucunun sıcaklığı ölçüldü. Numune tutucunun istenilen sıcaklıklara düşürüldüğü sıcaklık ölçer ile gözlemlendi.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI



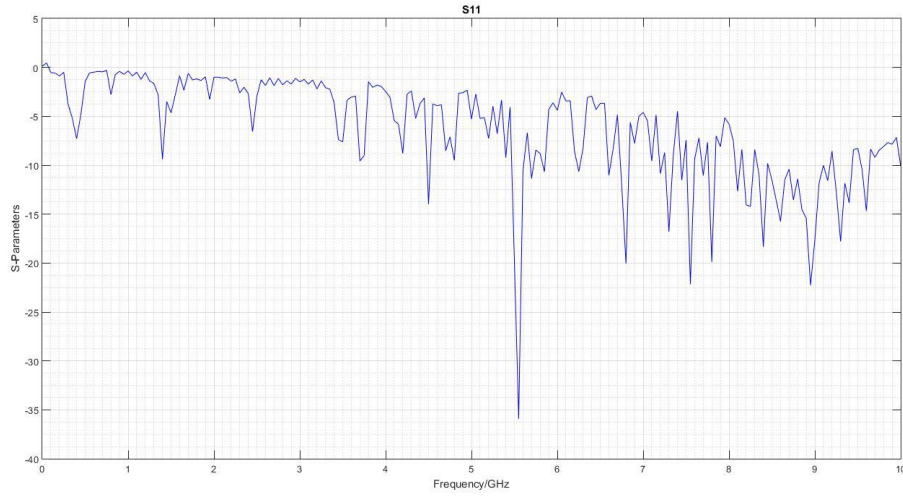
Şekil 4.1. CST Microwave Studio program ile yapılan rezonator simülasyon çalışması

CST ile yapılan çalışma sonucunda S parametreleri elde edilmiş ve Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Projedeki YBCO rezonatörünün simülasyon ile elde edilen S11 grafiğinin frekansa karşı değişimi

Şekil 4.2'den görüleceği gibi simülasyon ile elde edilen rezonatörde 9 GHz civarında rezonans frekansına sahiptir. Gerçek ölçülen değerler ile uyumludur.



Şekil 4.3. YBCO'dan yapılmış rezonatöre ait S11 grafikleri

Şekil 4.3 S11 grafiklerinden görüldüğü gibi YBCO rezonatör 6 GHz civarında rezonansa gelmiştir.

Kalite faktörü, S parametreleri kullanılarak hesaplandı. Hesaplama için aşağıdaki matlab kodu kullanıldı.

```
clc;
clear all;
f=xlsread('H_10.Dec.2016.10.50.xlsx','A:A');
s=xlsread('H_10.Dec.2016.10.50.xlsx','B:B');
%subplot(1,2,1)
plot(f,s,'b');
xlabel('Frequency/Hz');
ylabel('S-Parameters');
grid on;
grid minor;
title('S11');
% Calculate Resonance frequency: f0 and f1
mik=1;
```

```
[val,f0_ind]=min(s); %CalculateF0
```

```
f1_ind=f0_ind+mik;
```

```
f2_ind=f0_ind-mik;
```

```
f0=f(f0_ind);
```

```
f1=f(f1_ind);
```

```
f2=f(f2_ind);
```

```
s0=s(f0_ind);
```

```
s1=s(f1_ind);
```

```
s2=s(f2_ind);
```

```
farks1=abs(s1-s0);
```

```
farks2=abs(s2-s0);
```

```
farkf1=abs(f0-f1);
```

```
farkf2=abs(f0-f2);
```

```
b=farks1/3; %db aralıkları
```

```
db1=b/0.01;
```

```
b2=farks2/3;
```

```
db2=b2/0.01;
```

```
c=farkf1/db1; % f artışı
```

```
c2=farkf2/db2;
```

```
f1y(1,1)=f1;
```

```
f2y(1,1)=f2;
```

```
if f0-f1 >0
```

```
for i=1:1:(round(db1)-1)
```

```
    f1y(i+1,1)=f1y(i,1)+c;
```

```
end
```

```
else
```

```
for i=1:1:(round(db1)-1)
```

```
    f1y(i+1,1)=f1y(i,1)-c;
```

```
end
```

```
end
```

```
z1=(round(db1)-100);
```

```
f1yy=f1y(z1,1);
```

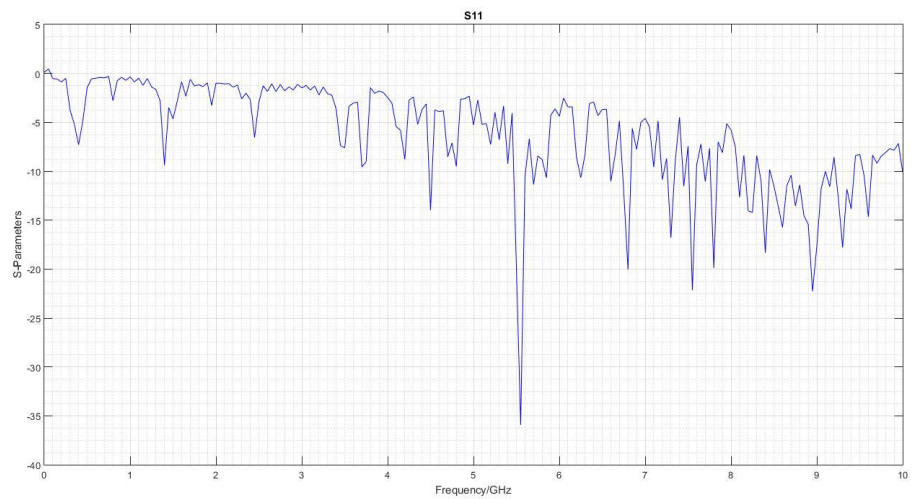
```

if f0-f2>0
for i=1:1:(round(db2)-1)
f2y(i+1,1)=f2y(i,1)+c2;
end
else
for i=1:1:(round(db2)-1)
f2y(i+1,1)=f2y(i,1)-c2;
end
end
z2=(round(db2)-100);
f2yy=f2y(z2,1);
delta2=abs(f1yy-f2yy);
Q=f0/delta2

```

Q =

361.8219 (S11 parametresi için)



Şekil 4.4. YBCO'dan yapılmış rezonatöre ait S21 grafikleri

S21 parametresi için $Q=199.6109$ hesaplandı.

Matlab ile yapılan hesaplamalar sonucunda YBCO'dan yapılan rezonatörlere ait kalite faktörünün 10^2 ile 10^3 mertebesinde olduğu tespit edildi. Bulunan sonuçlar literatürde belirtilen değerlere yakın olduğu tespit edilmiştir.



5. SONUÇ

Sonuç olarak biz süperiletken mikrodalga rezonatörlerdeki Abrikosov vortekslerinin varlığından kaynaklı enerji kayıplarının, antidotların girişiyle belirgin derecede azaltılabileceğini deneysel olarak ispat ettik. Bu doğrultuda, mT aralığındaki sonlu uygulanan alanlarda $Q(B)$ kalite faktörü, bu metotla büyük ölçüde artırılabilir. Hem simülasyon hem de deneysel sonuçlardan rezonatörün 9 GHz civarında rezonans frekansına sahip olduğu görülmüştür. Yapılan S11 ölçümlerinden en düşük dB değeri dikkate alınarak rezonans frekansı tespit edilip, bu frekanstan her iki yöne 3dB azalan noktalar bulunmuştur. Bu noktalar arasındaki fark dikkate alınarak kalite faktörleri hesaplanmıştır. YBCO süperiletken rezonatörlere ait bulunan kalite faktörlerinin 10^2 ile 10^3 mertebesinde olduğu ölçülmüştür.

KAYNAKLAR

- D. Bothner, C. Clauss, E. Koroknay, M. Kemmler, T. Gaber, M. Jetter, 2011. Reducing vortex losses in superconducting microwave resonators with microsphere patterned antidot arrays Physikalisches Institut and Center for Collective Quantum Phenomena in LISA, Auf der Morgenstelle 14, 74.25.Qt, 74.25.Wx, 84.40.Dc, 03.67.Lx.
- D. Bothner, T. Gaber, M. Kemmler, D. Koelle, and R. Kleiner, 2011. Improving the performance of superconducting microwave resonators in magnetic fields. Physikalisches Institut, Auf der Morgenstelle 14, 74.25.Qt, 74.25.Wx, 84.40.Dc, 03.67.Lx.
- Demirdiř S., 2008. Vorteks Mekanizmasının Süperiletkenliğe Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Ekizer A., 2013. $Y_3Ba_5Cu_8O_x$ Süperiletken Bileşiğinin Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Özabacı, M., 2008. Süperiletken MgB2 kalın filmlerin hazırlanması, mikroyapısal ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Yurtcan M.T., Şimşek Ö., Ertuğrul M., 2011. Darbeli lazer yığma sistemi (PLD) ile YBCO ince filmlerin hazırlanması. EÜFBED - Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4-2, 157-167.
- Yurtcan M. T., Şimşek Ö., Yılmaz M., Hasar U.C., Ertuğrul M., Bayram Ö. Influence of Deposition Pressure (O₂) on the YBCO (Y123) Thin Films Prepared by Pulsed Laser Deposition. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 1557-1939, 1873-1877.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Trabzon’da doğdum. İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimimi Erzurum’da tamamladım. 2013 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Elektrik–Elektronik Mühendisliğinden mezun oldum. 2014 yılında Atatürk Üniversitesinde Elektronik Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başladım. 2015 Haziran ayından beri Erzurum Büyükşehir Belediyesi Eski Genel Müdürlüğünde Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak çalışmaktayım.

