



**ALÇAK GEÇİREN MİKROŞERİT FİLTRE TASARIMI VE İNCE FİLM
TEKNOLOJİSİ İLE ÜRETİMİ**

Reşat TÜZÜN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2018

Reşat TÜZÜN tarafından hazırlanan “ALÇAK GEÇİREN MİKROŞERİT FİLTRE TASARIMI VE İNCE FİLM TEKNOLOJİSİ İLE ÜRETİMİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Nursel AKÇAM

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Erkan AFACAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Selma ÖZAYDIN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 02/07/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Reşat TÜZÜN

02/07/2018

ALÇAK GEÇİREN MİKROŞERİT FİLTRE TASARIMI VE İNCE FİLM TEKNOLOJİSİ İLE ÜRETİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Reşat TÜZÜN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2018

ÖZET

Mikroşerit filtreler Radyo Frekansı (Radio Frequency – RF)/mikrodalga uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Mikroşerit filtrelerin, mikrodalga devreleri, radarlar, hücrel haberleşme, test ve ölçüm sistemleri gibi çeşitli uygulama alanları vardır. Küçük boyutları, ucuz ve kolay üretimleri nedeniyle mikroşeritler günümüzde filtre uygulamalarında çokça tercih edilmektedir. Mikrodalga filtre, mikrodalga sistemde geçiş bandındaki frekanslarda iletim ve durdurma bandındaki frekanslarda zayıflatma sağlayarak belli noktadaki frekans cevabını kontrol etmek için kullanılan iki kapılı elemandır. Tipik frekans cevapları alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren ve bant durdurandır. Ayrıca Chebyshev, Eliptik ve Maximally Flat gibi yaklaşımlar filtre karakteristiklerinde tanımlayıcı olmaktadır. Bu tez çalışmasında, Chebyshev, Eliptik ve Maximally Flat yaklaşımlarıyla alçak geçiren mikroşerit filtreler tasarlanmıştır. Bu tasarımlardan kesime en hızlı giden, bastırma oranı yüksek olan ve üretime en uygun filtre, İnce Film Teknolojisi (Thin Film Technology) kullanılarak üretilmiş ve test edilmiştir. Tasarlanan ve üretilen filtre, 6 GHz kesim frekansına ve 6,6 GHz frekansında 40 dB bastırma oranına sahiptir. Tasarlanan filtrenin benzetim ve analizlerinde AWR tasarım programı kullanılmıştır. Filtrenin ölçümünde de Vector Signal Generator kullanılmıştır. Ayrıca, bu tez çalışmasında üretilen filtrede kullanılan İnce Film Üretim Teknolojisi'ne ayrıntılı olarak yer verilmiştir. Ülkemizde yeni yaygınlaşmaya başlayan bu teknoloji ile daha az kayıplı ve daha düzenli tasarımların üretilmesinin mümkün olduğu gösterilmiştir.

Bilim Kodu : 90516
Anahtar Kelimeler : Alçak Geçiren Filtre Tasarımı, Mikroşerit Filtre, Chebyshev Filtre, İnce Film Üretim Teknikleri
Sayfa Adedi : 67
Danışman : Doç. Dr. Nursel AKÇAM

DESIGN OF MICROSTRIP LOW PASS FILTER AND IMPLEMENTATION WITH
THIN FILM TECHNOLOGY

(M. Sc. Thesis)

Reşat TÜZÜN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2018

ABSTRACT

Microstrip filters have a significant role in Radio Frequency/Microwave applications. Microstrip filters are common on microwave circuits, satellite communications, radars, test equipments and so on. Because microstrip filters are compact, cheap and easy to produce, they are highly preferred for microwave applications. Microwave filter; microwave system is a two-ported element used to control the frequency response at a certain point by attenuating the frequencies in the stop band by transmitting in the frequency band. Typical frequency responses are low pass, high pass, band pass and band stop. Also, approaches such as Butterworth, Chebyshev, and Elliptic are defining filter characteristics. In this thesis, microstrip filters having Chebyshev, Elliptic and Maximally Flat approaches were designed. The filter having best cutoff, highest attenuation and optimum design for production was produced using Thin Film Technology and tested. This filter having 6 GHz cutoff frequency and having 42 dB at 6,6 GHz. AWR Sonnet is used for the simulation and analysis of this filter. And, Vector Signal Generator is used for filter's test. Furthermore, this thesis includes details of Thin Film Technology used in production of design filter. It is common in our country lastly. This technology provides less loss and more compact designs.

Science Code : 90516

Key Words : Low Pass Filter Design, Microstrip Filter, Chebyshev Filter, Thin Film Production Techniques

Page Number : 67

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Nursel AKÇAM

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında önemli rol alan değerli danışman hocam Doç. Dr. Nursel AKÇAM'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Filtre tasarımında bana yol gösteren ve yardımını hiç esirgemeyen Aselsan personeli değerli arkadaşım, Emrah KOÇ'a çok teşekkür ederim. Yine Aselsan personellerinden olan, filtre tasarımının üretiminde ve testinde destek aldığım Hacer Hanım'a, Murat'a, Alper'e ve Berkay'a teşekkürü borç bilirim. Üretim ve test altyapısını kullandığım ASELSAN A.Ş.'ye ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Tezimin düzeltilmesinde yardımcı olan Meltem'e teşekkür ederim. Yaptığım çalışmalarda, var olan isteğimi bir kat daha arttıran, sonuçlanmasına doğrudan katkı sağlayan değerli aileme ve sevgili eşim Nuray TÜZÜN'e içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. MİKRODALGA FİLTRELER.....	5
2.1. Mikrodalga Filtre Çeşitleri	5
2.1.1. Bant durduran filtreler	6
2.1.2. Bant geçiren filtreler	8
2.1.3. Yüksek geçiren filtreler	9
2.1.4. Alçak geçiren filtreler	10
2.2. Filtre Tasarım Metotları	12
2.2.1. Görüntü parametreleri metodu	12
2.2.2. Araya girme kaybı metodu	12
2.3. Filtre Yaklaşım Metotları	14
2.3.1. Maximally Flat (Butterworth veya Binomial) yaklaşım.....	15
2.3.2. Chebyshev (Equal Ripple) yaklaşım.....	15
2.3.1. Eliptik (Elliptic - Cauer) yaklaşım.....	16
3. ALÇAK GEÇİREN FİLTRE TASARIMI VE BENZETİMİ	17

	Sayfa
3.1. Alçak Geçiren Prototip Chebyshev Filtre Teorisi	17
3.2. Pasif Alçak Geçiren Mikroşerit LC Filtre Tasarımı.....	19
3.3. AWR Filtre Benzetim Sonuçları	28
4. İNCE FİLM TEKNOLOJİSİ İLE MİKROŞERİT FİLTRE ÜRETİMİ	29
4.1. İnce Film Teknolojisi.....	29
4.2. İnce Film Üretim Adımları	29
4.2.1. Püskürtme ile kaplama	30
4.2.2. İnce film biriktirme	31
4.2.3. Fotolitografi (Photolithography)	32
4.3. Tasarlanan Mikroşerit Filtrenin Üretimi ve Testi	44
5. FİLTRE TASARIM VE ÜRETİM SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI.....	59
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. RF/Mikrodalga spektrumu.....	1
Şekil 2.1. Temel filtre çalışma prensibi	5
Şekil 2.2. Filtre çeşitleri	5
Şekil 2.3. Bant durduran filtre frekans cevabı	7
Şekil 2.4. Bant durduran filtre $A(\omega)$ /dB Bastırma (solda) ve Transfer Fonksiyonu (sağda) grafikleri.....	7
Şekil 2.5. Bant geçiren filtre frekans cevabı	8
Şekil 2.6. Bant geçiren filtre $A(\omega)$ /dB Bastırma (solda) ve Transfer Fonksiyonu (sağda) grafikleri.....	9
Şekil 2.7. Yüksek geçiren filtre frekans cevabı	9
Şekil 2.8. Yüksek geçiren filtre $A(\omega)$ /dB Bastırma (solda) ve Transfer Fonksiyonu (sağda) grafikleri.....	10
Şekil 2.9. Alçak geçiren filtre frekans cevabı	11
Şekil 2.10. Alçak geçiren filtre temel çalışma prensibi (altta) $A(\omega)$ /dB Bastırma (üstte) grafiği.....	11
Şekil 2.11. Görüntü parametreleri yöntemiyle kas kat yapıda filtre tasarımı	12
Şekil 2.12. Araya Girme Kaybı yöntemiyle filtre tasarımı	13
Şekil 2.13. Araya Girme Kaybı metodunda P_{LR} ve S_{21} ilişkisi.....	14
Şekil 2.14. İdeal ve deneysel filtre cevapları	14
Şekil 2.15. Equal Ripple ve Maximally Flat yaklaşımların karşılaştırılması	16
Şekil 2.16. Eliptik yaklaşımın gösterimi.....	16
Şekil 3.1. Filtre tipinin seçilmesi	20
Şekil 3.2. Eliptik filtre için sırasıyla 9., 13. ve 15. dereceden filtre tasarımları	21
Şekil 3.3. Eliptik filtre yaklaşımı ile AWR tasarımı.....	21

Şekil	Sayfa
Şekil 3.4. Maximally Flat filtre için sırasıyla 9., 13. ve 17. dereceden filtre tasarımları	22
Şekil 3.5. Maximally Flat filtre yaklaşımı ile AWR tasarımı	23
Şekil 3.6. Chebyshev filtre için sırasıyla 9., 11. ve 13. dereceden filtre tasarımları	23
Şekil 3.7. Chebyshev yaklaşımı ile AWR tasarımı.....	24
Şekil 3.8. Filtre tipinin seçilmesi (Optimum Distributed Lowpass Filter)	25
Şekil 3.9. Chebyshev yaklaşımı ile AWR tasarımı (Optimum Distributed Lowpass Filter)	25
Şekil 3.10. Filtre yapısının fiziksel devre şeması	27
Şekil 3.11. Tasarlanan filtrenin 2 boyutlu görseli (iletken kısmı)	27
Şekil 3.12. AWR Axiem Tool ile alınmış benzetim sonucu.....	28
Şekil 4.1. Püskürtme (Sputtering) mekanizması (DC).....	30
Şekil 4.2. Püskürtme (Sputtering) mekanizması (RF)	31
Şekil 4.3. Alttaşın bakır ile elektroliz edilmesi.....	32
Şekil 4.4. Fotorezist kaplama.....	34
Şekil 4.5. Rezist kaplama aşamaları	35
Şekil 4.6. İlk pişirme.....	36
Şekil 4.7. Hizalama, maruz kalma ve banyo adımları	37
Şekil 4.8. Hizalama yöntemleri.....	38
Şekil 4.9. Temaslı hizalama yöntemi.....	38
Şekil 4.10. Yakın hizalama yöntemi	39
Şekil 4.11. Projeksiyon hizalama yöntemi.....	40
Şekil 4.12. Fotorezistin sıcaklık artışına bağlı değişimi	41
Şekil 4.13. Aşındırma ve biriktirme işlemleri.....	41
Şekil 4.14. Etch-Back işlem adımları	42

Şekil	Sayfa
Şekil 4.15. Lift-Off işlem adımları	43
Şekil 5.1. 1 numaralı filtrenin test sonuç grafiği.....	59
Şekil 5.2. 2 numaralı filtrenin test sonuç grafiği.....	60
Şekil 5.3. 3 numaralı filtrenin test sonuç grafiği.....	60
Şekil 5.4. S_{11} Yansıma Kaybı sonuçlarının karşılaştırılması	61
Şekil 5.5. S_{11} Yansıma Kaybı ve S_{21} Araya Girme Kaybı sonuçlarının karşılaştırılması	62



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Chebyshev alçak geçiren filtrenin eleman değerleri ($g_0 = 1.0, \Omega_c = 1$).....	19



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Altın kaplı alttaş (wafer).....	45
Resim 4.2. Alttaşın fotorezist ile kaplanması	45
Resim 4.3. Fotorezist kaplanmış alttaş görüntüsü	46
Resim 4.4. Ön ısıtma işlemi	46
Resim 4.5. Doğrudan yazma yöntemi ile desen baskı	47
Resim 4.6. Rezistin arındırılması için kimyasala daldırılması	48
Resim 4.7. Rezist tabakasının arınmaya başlaması	48
Resim 4.8. Kurutma işlemi	49
Resim 4.9. Son ısıtma işlemi.....	49
Resim 4.10. Alttaşın altın aşındırıcıya maruz bırakılması.....	50
Resim 4.11. Alttaşın altın aşındırıcıdan çıkarılması	50
Resim 4.12. Desen dışında kalan titanyum metalizasyonunun görüntüsü.....	51
Resim 4.13. Alttaşın titanyum tabakasından arındırılması	51
Resim 4.14. Sadece rezist koruma tabakasının olduğu desen görüntüsü.....	52
Resim 4.15. Desen oluşturulmuş alttaş görüntüsü	52
Resim 4.16. Aygıtların lazer kesim cihazı ile alttaştan çıkarılması.....	53
Resim 4.17. Aygıtın 50 kuruş ile boyutsal karşılaştırılması	53
Resim 4.18. Aygıtın test noktası ile birlikte görünümü	54
Resim 4.19. Aygıt ve test noktası arasına atılan 2 adet 1 mil telin görüntüsü.....	54
Resim 4.20. 3 adet aygıtın test için 2 kupona dizilmiş görüntüsü	55
Resim 4.21. Test düzeneğinin kurulması.....	55
Resim 4.22. Aygıtın test düzeneğine yerleştirilmesi	56
Resim 4.23. Probe ucunun test noktasına inmiş halinin mikroskop görüntüsü	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

dB	desibel
Hz	Hertz
KHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
um	mikrometre
mm	milimetre
Ω	Ohm

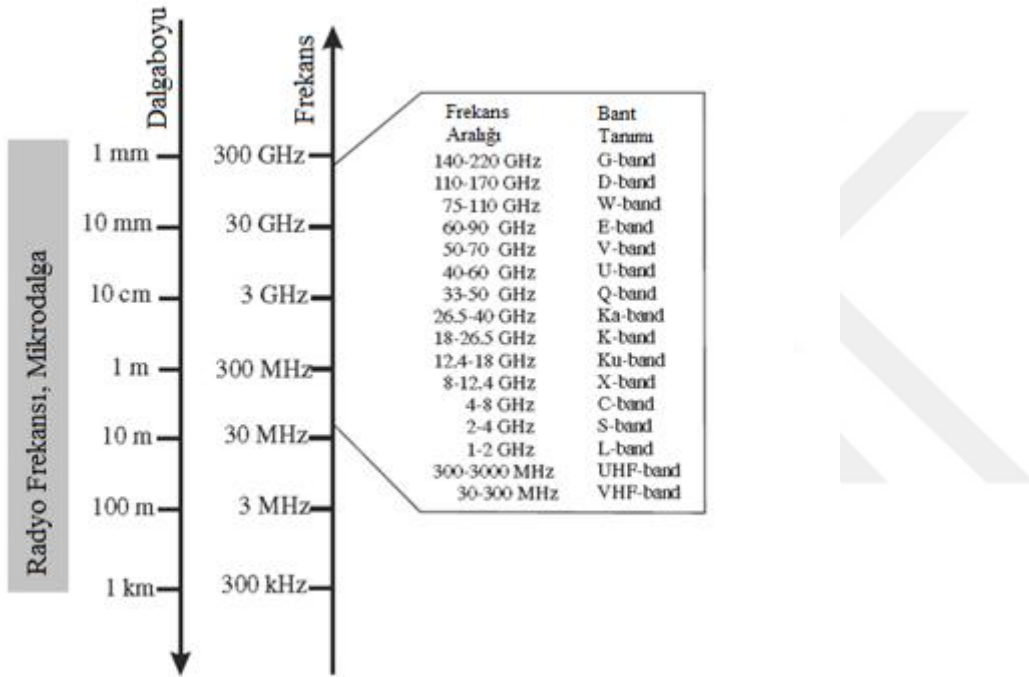
Kısaltmalar

Açıklamalar

AC	Alternative Current (Alternatif akım)
DI	De-iyonize
EPA	Entegre Pasif Aygıtlar
LC	Endüktans Kapasitans
NRL	Naval Research Laboratory
RF	Radio Frequency (Radyo frekansı)
RPM	Round Per Minute (dakikadaki tur sayısı)

1. GİRİŞ

Mikrodalga, dalga boyu 1 m ile 1 mm arasında olan ve 300 MHz ile 300 GHz frekans aralığı olan elektromanyetik dalgaların tanımlanmasında kullanılır. Dalga boyları 1 mm – 10 mm ve frekans aralığı 30 GHz – 300 GHz arasında olan elektromanyetik dalgalar ise milimetre dalga olarak tanımlanır. Milimetre dalganın üzeri ise infrared olarak adlandırılır ve dalga boyu 1 um ile 1 mm arasındadır (Şekil 1.1) [3,9].



Şekil 1.1. RF/Mikrodalga spektrumu

Mikrodalga Filtreler, mikrodalga ve RF uygulamalarında çok önemli bir yere sahiptir. Birbirinden farklı frekansları ayırırlar ya da birleştirirler. Elektromanyetik spektrum sınırlı olduğundan kullanım alanlarına göre paylaşılması gerekir. RF/Mikrodalga sinyallerinin spektrumunda sınırlarının belirlenmesi için filtrelerin kullanılması gerekir. Kablosuz iletişim gibi sürekli gelişmekte olan alanlarda, RF/Mikrodalga uygulamalarında kullanılacak filtrelerin daha hafif, daha küçük ve daha az maliyetli olması beklenir. Bu yönde oluşan gereksinimleri karşılamak için filtreler toplu eleman ve ayrık eleman devreleri olarak tasarlanır. Bu tasarımlar dalga kılavuzu, koaksiyel hat ve mikroşerit gibi çeşitli iletim hatlarından oluşur.

Mikrodalga filtreler alanında yapılan ilk çalışmalar 2. Dünya Savaşı'na dayanır. 1941-1945 yılları arasında Massachusetts Institute of Technology (M.I.T) radyasyon laboratuvarı, Harvard Radyo Araştırma Laboratuvarı, Bell Laboratuvarları ve Naval Research Laboratory (NRL) gibi Birleşik Devletler'de bulunan önemli kuruluşlarda çok ciddi çalışmalar ve uygulamalar yapılmıştır. Buralarda yapılan çalışmalar halen günümüzde modern teknolojiye kullanılmaktadır [8].

Filtre teorisinin ortaya atılması Mason, Sykes, Darlington, Fano, Lawson ve Richards gibi öncüler tarafından 2. Dünya Savaşı yıllarında başlamıştır. Görüntü parametreleri metodu ile filtre tasarımı 1930'ların sonuna doğru geliştirilmiş olup, radyo ve telefon uygulamalarındaki alçak frekans filtreleri için kullanılmıştır. 1950'lerin başında, içlerinde G. Matthaei, L. Young, E. Jones, S. Cohn ve daha birçok bilim insanını barındıran Stanford Araştırma Enstitüsü'nde mikrodalga filtreler ve kuplör geliştirme konularında aktif çalışmalara başlandı. Günümüzde mikrodalga filtre tasarımlarının çoğu araya girme metoduna (Insertion Loss) dayalı bilgisayar tabanlı tasarım araçları ile gerçekleştirilmektedir. Ayrık elemanların, süper iletken olması, küçük boyutlara sahip olması ve ucuz üretim yöntemleri ile elde edilebiliyor olması gibi avantajları göz önünde bulundurulduğunda bu alandaki araştırmaların daha çok devam edeceği açıktır [1].

Bu tez çalışmasında tasarımı gerçekleştirilen Alçak Geçiren Filtre'nin İnce Film Teknolojisi kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen filtrelerin test sonucunda elde edilen S parametreleri karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

2.Bölüm'de mikrodalga filtrelerin genel tanımı yapılmış olup, mikrodalga filtreler ile ilgili bilgiler verilmiştir. Mikrodalga filtre çeşitleri, filtre tasarım metotları ve filtre yaklaşım metotlarına detaylı olarak yer verilmiştir.

3.Bölüm'de AWR filtre tasarım programı kullanılarak alçak geçiren filtre tasarımları yapılmış ve benzetim sonuçları verilmiştir. Tasarımda kullanılan yöntemler de bu bölümde yer almaktadır. Tasarımı yapılan filtrelerin benzetim sonuçları arayüzde gösterilmiş ve karşılaştırma yapılarak en uygun filtre tasarımı belirlenmiştir. Belirlenen tasarımın devre şeması ve 3 boyutlu desen çizimi elde edilerek üretim için gerekli tüm çıktılar elde edilmiştir.

4.Bölüm’de, bir önceki bölümde tasarımı gerçekleştirilen filtrenin İnce Film Teknolojisi ile üretimi anlatılmıştır. Bu bölümde üretim yönteminin detaylarına da yer verilmiştir. Tasarlanan mikroşerit filtre İnce Film Teknolojisi ile üretilmiş ve test edilmiştir.

5.Bölüm’de, üretimi yapılan mikroşerit filtrelerin karşılaştırılması ve sonuçlara göre yapılan yorumlara yer verilmiştir. Üretimi yapılan filtrelerin Vector Signal Generator ile yapılan testlerin çıktıları ve AWR benzetim sonuçları karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu bölümde S parametreleri yöntemi ile değerlendirilen filtre frekans cevaplarının S_{11} yansıma kaybı ve S_{21} araya girme kaybı değerleri ayrı ayrı gösterilmiş ve değerlendirilmiştir.

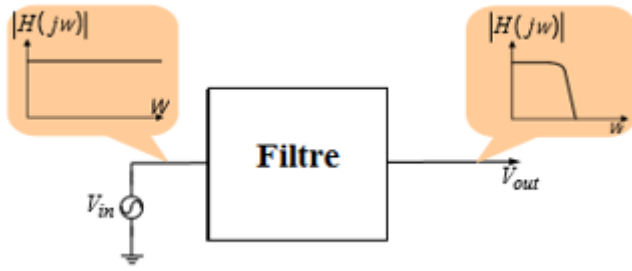
6.Bölüm’de de, elde edilen sonuçlar değerlendirilerek tezin amacı ve sonuca ulaşıp ulaşılmadığı tartışılmıştır. Bu tez çalışmasında kazanılan tecrübe ile önerilerde bulunulmuştur.



2. MİKRODALGA FİLTRELER

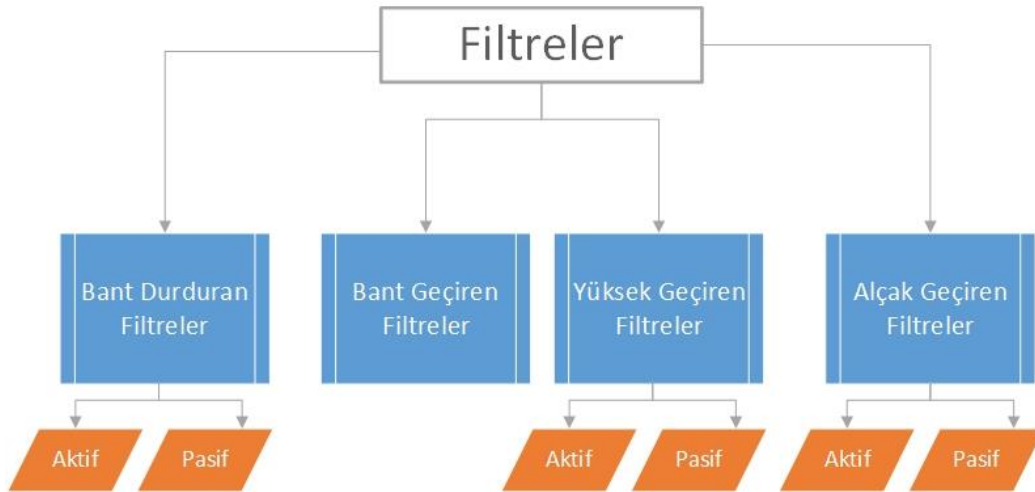
2.1. Mikrodalga Filtre Çeşitleri

Mikrodalga filtreler, haberleşme sistemlerinin kanal seçme ve işaret ayırıştırma işlemlerinde kullanılan temel elemanlardır. Temel filtre çalışma prensibi Şekil 2.1.'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.1. Temel filtre çalışma prensibi

RF/Mikrodalga filtreler kendi içinde Bant Durduran Filtreler, Bant Geçiren Filtreler, Yüksek Geçiren Filtreler ve Alçak Geçiren Filtreler olarak sınıflandırılırlar. Bant Geçiren filtre dışındaki filtreler kendi içinde Aktif ve Pasif olmak üzere ikiye ayrılırlar (Şekil 2.2) [2].



Şekil 2.2. Filtre çeşitleri

Aktif filtrelerde iletim tarafında sinyal gücü artırılabilirken, pasif filtrelerde güç yükseltilmesine izin verilmez [2]. Bu durum Aktif ve Pasif filtreler arasındaki farktır.

İletim bandı ve durdurma bandını tanımlamada kullanılan frekans spekleri f (Hz) ya da ω (radyan/saniye) cinsinden gösterilebilir. Bu çalışmada farklı frekans (f) değerlerinde giriş ve çıkış tanımlamaları için her iki gösterim de kullanılmıştır [5].

Diğer önemli filtre spekleri filtre cevabındaki iletim ve durdurma bantlarının kazanç (Gain – G) karakteristikleridir. Basitçe bir filtrenin kazancı, çıkış sinyal seviyesinin giriş sinyal seviyesine oranıdır. Eğer filtre kazancı 1 değerinden büyükse, çıkış sinyali giriş sinyalinden büyüktür, eğer 1'den küçükse, çıkış girişten küçüktür. Çoğu filtre uygulamalarında, durdurma bandında kazanç çok küçüktür. Bu nedenle, kazanç değeri (2.1) eşitliğindeki gibi dB cinsine çevrilir. Örneğin bir filtrenin iletim bandında kazanç değeri 0,707 veya – 3 dB olarak tanımlanırken, durdurma bandında da bastırma değeri 0,0001 veya – 80 dB olarak tanımlanabilir [5].

$$G_{dB} = 20 \cdot \log_{10}(G) \quad (2.1)$$

Desibel cinsinden tanımlamak, çok küçük kazançlar için daha anlamlıdır. Bazı tasarımcılar kazanç yerine bastırma (veya kayıp) değerlerini tercih ederler. Basitçe, bastırma değerleri kazanç değerlerinin tersi olarak tanımlanır. Örneğin; belirli bir frekansta $\frac{1}{2}$ kazanç değerine sahip bir filtrenin bastırma değeri 2'dir. Bastırma değerini (Attenuation – A) dB cinsinden tanımlamak gerekirse,

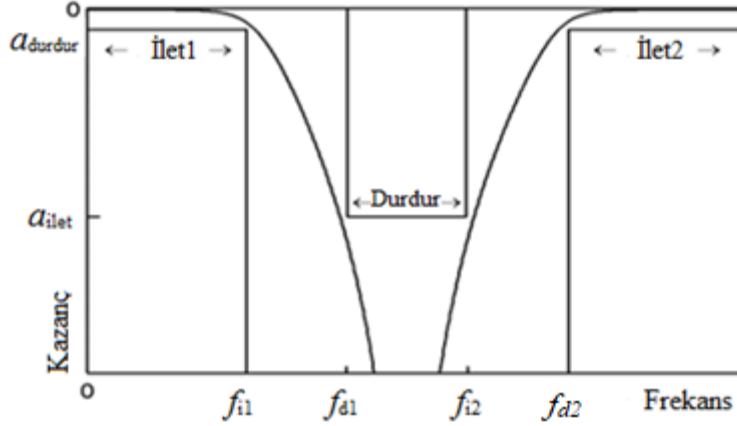
$$A_{dB} = 20 \cdot \log_{10}(G^{-1}) = -20 \cdot \log_{10}(G) = -G_{dB} \quad (2.2)$$

eşitliğindeki gibi kazanç değerinin negatifi olduğu görülebilir [5].

2.1.1. Bant durduran filtre

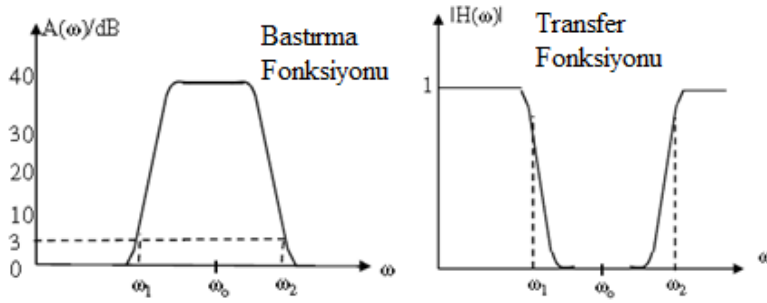
Bant durduran filtrede asıl amaç belirlenen frekans aralığını bastırmak, kalan frekans değerlerini de iletmektir. İki iletim bandının arasında bir durdurma bandı ile tanımlanır. Durdurma bandı, bandın alçak kenar frekansı (alt kesim frekansı da denir) olan f_{d1} ile yüksek kenar frekansı (yüksek kesim frekansı da denir) f_{d2} arasında kalan alandır. Durdurma filtrelerinin iki iletim bandı vardır. Alçak iletim bandı 0'dan başlayıp f_{i1} 'e kadar devam ederken, yüksek olan iletim bandı ise, f_{i2} 'den başlayıp sonsuza (analog filtreler için geçerli)

kadar devam eder. Durdurma kazanç parametresi olarak tek bir $a_{\text{durdur}}(\text{dB})$ parametresi kullanılır. Alçak ve yüksek iletim bantları için gerekirse sırasıyla $a_{\text{ilet1}}(\text{dB})$ ve $a_{\text{ilet2}}(\text{dB})$ olarak kullanılabilir (Şekil 2.3) [5].



Şekil 2.3. Bant durduran filtre frekans cevabı

Bant durduran filtrenin frekans cevabı bastırma ve transfer fonksiyonu parametreleriyle Şekil 2.4.'teki grafiklerle gösterilebilir. Şekil 2.4.'teki grafikte $A(\omega)$ bastırma fonksiyonunu, $H(\omega)$ transfer fonksiyonunu, ω da $\omega = 2\pi f$ açısal frekansını ifade eder.



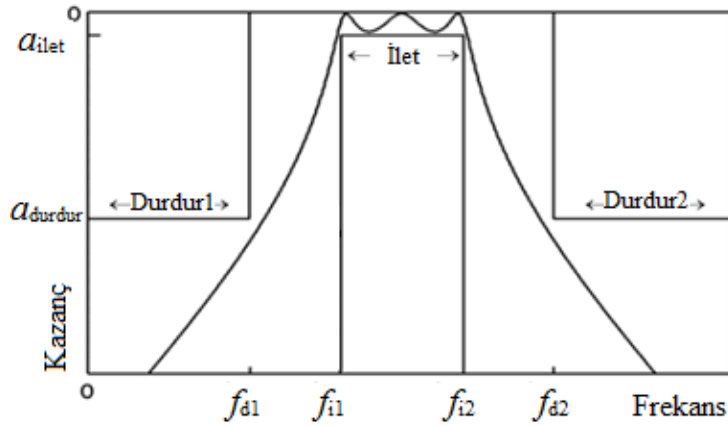
Şekil 2.4. Bant durduran filtre $A(\omega)/\text{dB}$ Bastırma (solda) ve Transfer Fonksiyonu (sağda) grafikleri [2]

Bant durduran filtre uygulamaları için mükemmel bir örnek 60-Hz çentik filtrenin kullanıldığı hassas ölçüm cihazı olacaktır. Günümüzde çoğu elektronik ölçüm takımları 60 Hz giriş frekansına sahip Alternatif Akım (Alternative Current – AC) güç kaynağı ile çalışır (Türkiye'de 50 Hz'dir bu değer). Bu frekans aralığının dışında kalan ve problem

yaratabilecek frekansların elenmesi amacıyla $f_{durdur1}$ 58 Hz ve $f_{durdur2}$ 62 Hz olarak ayarlanıp kullanılır [5].

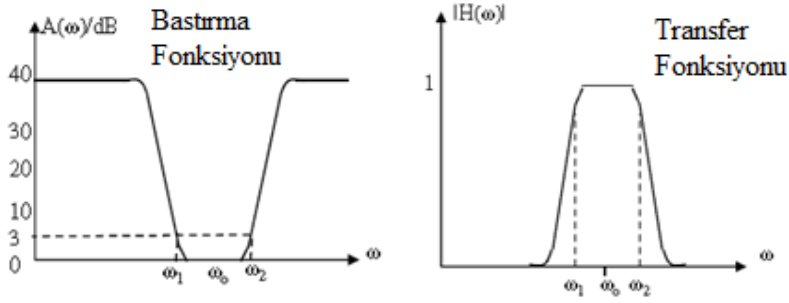
2.1.2. Bant geçiren filtre

Bant geçiren filtre, temelde bir frekans aralığını iletirken altında ve üzerinde kalan frekans değerlerini bastırır. Bant durduran filtrenin aksine bu filtrede, iki durdurma bandının arasında bir iletim bandı vardır. İletim bandı, bandın alçak kenar frekansı olan f_{ilet1} ile yüksek kenar frekansı olan f_{ilet2} arasında kalan alandır. Düşük olan durdurma bandı 0'dan başlayıp $f_{durdur1}$ 'e kadar devam ederken, yüksek olan durdurma bandı ise, $f_{durdur2}$ 'den başlayıp sonsuza (analog filtreler için geçerli) kadar devam eder. İletim kazanç parametresi olarak tek bir a_{ilet} (dB) parametresi kullanılır. Alçak ve yüksek durdurma bantları için sırasıyla $a_{durdur1}$ (dB) ve $a_{durdur2}$ (dB) olarak kullanılır (Şekil 2.5) [5].



Şekil 2.5. Bant geçiren filtre frekans cevabı

Bant geçiren filtrenin frekans cevabı bastırma faktörü ve transfer fonksiyonu parametreleriyle Şekil 2.6.'daki grafiklerle gösterilebilir.

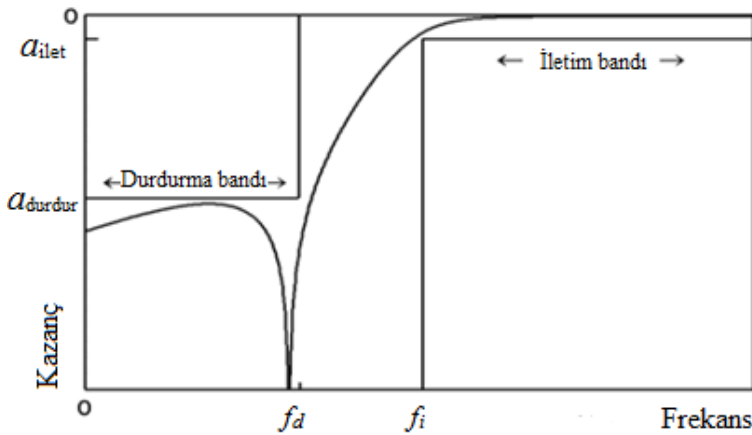


Şekil 2.6. Bant geçiren filtre $A(\omega)/dB$ Bastırma (solda) ve Transfer Fonksiyonu (sağda) grafikleri [2]

Bant durdurucu filtre uygulamalarına ses sinyallerinin işlenmesi iyi bir örnek olacaktır. Normal insan sesi 300 Hz ile 20 KHz aralığındadır. Bu nedenle insan sesini işleyecek herhangi bir sistemin bu ses aralığını alacak bir filtre kullanması gerekir. Bu durumda, f_{i1} 300 Hz iken f_{i2} 20 KHz olmalıdır [5].

2.1.3. Yüksek geçiren filtre

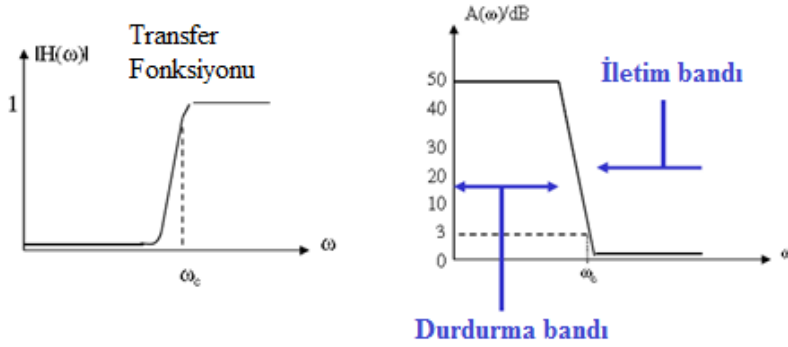
Yüksek geçiren filtre durdurma bandı ve iletim bandından oluşur. İletim bandı f_i 'den başlayıp sonsuza (analog filtreler için geçerli) kadar devam eder ve 0'dan başlayıp f_d 'ye kadar devam eden durdurma bandından daha yüksek frekanslardadır. Geçiş bandı, durdurma bandı ve iletim bandına yayılır (Şekil 2.7). İletim bandının kazancı $a_{ilet}(dB)$ iken durdurma bandının kazancı $a_{durdur}(dB)$ olarak tanımlanır [5].



Şekil 2.7. Yüksek geçiren filtre frekans cevabı

Yüksek geçiren filtreler alçak frekanstaki sinyalleri elemek için kullanılırlar. Örneğin; uzunçalarını oynatmak için pikap kullanıldığında, bazen pikapta rahatsız edici bir gürültü oluşur. Bu rahatsız edici gürültü 100 Hz'lik bir iletim bandı kenar frekansına sahip yüksek geçiren filtre ile giderilebilir [5].

Yüksek geçiren filtrenin frekans cevabı bastırma ve transfer fonksiyonu parametreleriyle Şekil 2.8.'deki grafiklerle gösterilebilir.



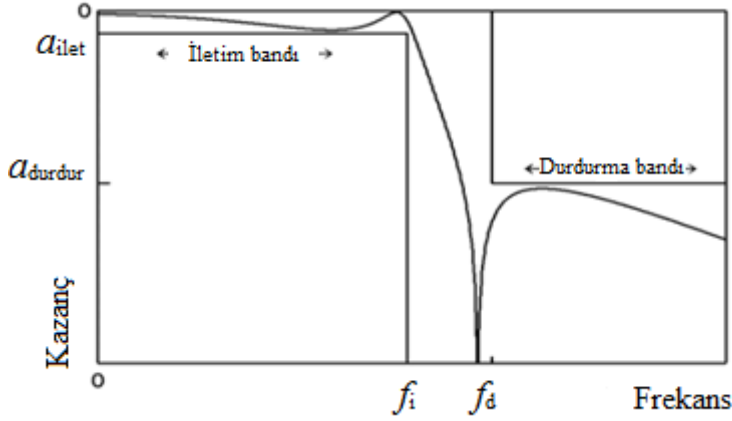
Şekil 2.8. Yüksek geçiren filtre $A(\omega)/dB$ Bastırma (solda) ve Transfer Fonksiyonu (sağda) grafikleri [2]

2.1.4. Alçak geçiren filtre

Bu tezin de konusu olan alçak geçiren filtrelerin frekans aralığı üç alana ayrılır. İletim bandı 0'dan iletim bandı kenar frekansı olan f_{ilet} 'e kadar devam ederken, durdurma bandı ise durdurma bandı kenar frekansı olan f_{durdur} 'dan sonsuza (analog filtreler için geçerli) kadar devam eder. Bu iki frekans bandı arasında yayılan geçiş bandı ise f_{ilet} ve f_{durdur} frekans aralığındadır. Filtre cevabı iletim bandında 0 dB ile iletim bandı kazancı olan $a_{ilet}(dB)$ arasında değişirken, durdurma bandında ise $a_{durdur}(dB)$ ile durdurma bandı kazancı olan eksi sonsuz arasında değişir. İletim bandındaki 0 dB kazanç, 1 kazancına denk iken, durdurma bandındaki eksi sonsuz kazancı 0 kazancına denktir (Şekil 2.9) [5].

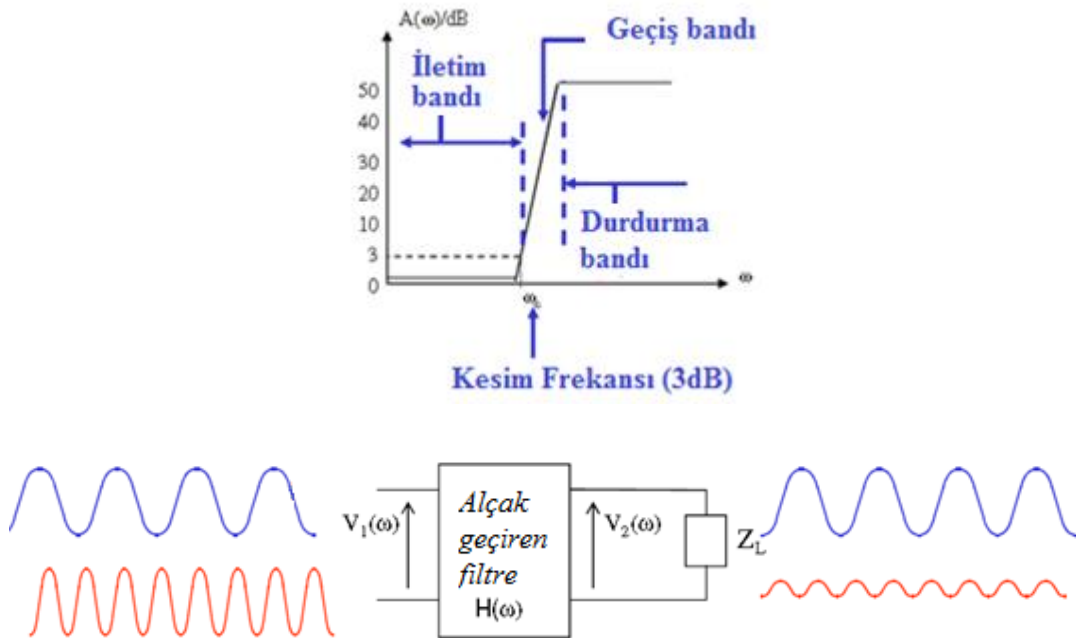
Alçak geçiren bir filtrenin seçiciliğini sadece dört parametre belirler. Bunlar; iletim bandı kazancı a_{ilet} , durdurma bandı kazancı a_{durdur} , iletim bandı kenar frekansı f_{ilet} ve durdurma bandı kenar frekansı f_{durdur} 'dur. Alçak geçiren filtreler yüksek frekanstaki sinyalleri elemek için kullanılırlar. Örneğin; eski bir ses bandı çok fazla yüksek frekans tıslamasına sahipse, iletim bandı kenar frekansı 8 kHz olan bir alçak geçiren filtre bu tıslamanın önemli bir

kısmını keser. Elbette, çoğaltılacak olan yüksek frekansları da ortadan kaldırır. Unutmamak gerekir ki, herhangi bir filtre sadece frekans bantları arasında ayırıştırma yapabilir, bilgi ve gürültü arasında değil [5].



Şekil 2.9. Alçak geçiren filtre frekans cevabı

Alçak geçiren filtrenin frekans cevabı bastırma faktörü parametreleriyle Şekil 2.10.'da görülmektedir.



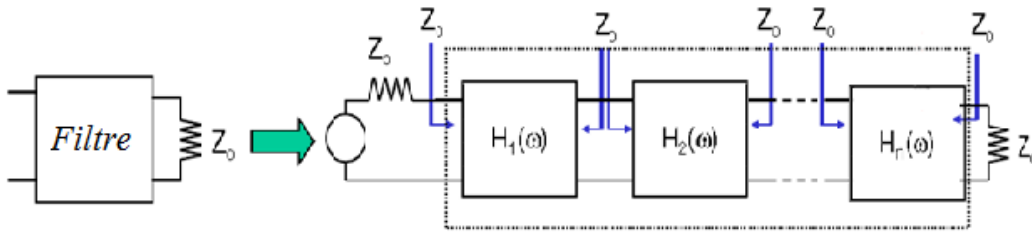
Şekil 2.10. Alçak geçiren filtre temel çalışma prensibi (altta) $A(\omega)/\text{dB}$ Bastırma (üstte) grafiği [2]

2.2. Filtre Tasarım Metotları

Düşük araya girme kaybı, yüksek geri dönüş kaybı ve bastırma bölgesinde dik eğim filtrelerden beklenen 3 önemli özelliktir. Filtre tasarımında görüntü parametreleri (Image Parameter Method) ve araya girme kaybı (Insertion Loss Method) olmak üzere iki yöntem vardır.

2.2.1. Görüntü parametreleri metodu

Görüntü parametreleri metodu basit filtre tasarımları için daha uygundur. Araya girme kaybı metoduna göre dezavantajı, rastgele frekans cevaplarının tasarıma dâhil edilemiyor olmasıdır. Görüntü parametreleri yönteminde; iki kapılı filtre parçaları istenilen zayıflama karakteristiğini ve kesim frekansını vermek üzere kaskat yerleştirilerek düzenlenir (Şekil 2.11) [2].



Şekil 2.11. Görüntü parametreleri yöntemiyle kaskat yapıda filtre tasarımı [2]

Bu filtre tasarımı kolay olmasına rağmen çok sayıda işlem adımına ihtiyaç duyulduğundan çok fazla tercih edilmez. Daha çok kullanılan bir yöntem olan araya girme kaybı yönteminde alçak geçiren filtre prototipi kullanılır.

2.2.2. Araya girme kaybı metodu

Araya girme kaybı, çeşitli frekans cevapları verebilen bir filtre tasarımına ve sentezine imkân tanır (Şekil 2.12). Günümüz bilgisayar tabanlı programlarda yaygın olarak araya girme kaybı metodu kullanılır. Bu metotta filtrenin frekans cevabı araya girme kaybı (Insertion Loss – IL) veya güç kaybı oranı (Power Loss Ratio – P_{LR}) olarak tanımlanır [2].

Güç kaybı oranı,

$$P_{LR} = \frac{P_{inc}}{P_{load}} = \frac{1}{1 - |\tau(\omega)|^2} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Bu eşitlikte P_{inc} = Kaynakta bulunan güç ve P_{load} = Yüke aktarılan güç olarak tanımlanır. Yük ve kaynak eşitlendiğinde araya girme kaybı dB cinsinden,

$$IL = 10 \log P_{LR} \quad (2.2)$$

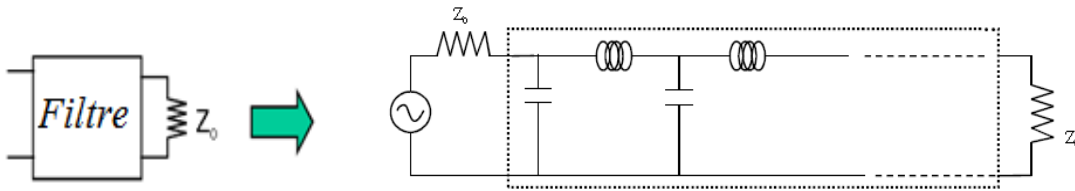
şeklinde bulunabilir. (2.1) eşitliğinden çıkarım yapılarak,

$$|\tau(\omega)|^2 = \frac{M(\omega^2)}{M(\omega^2) + N(\omega^2)} \quad (2.3)$$

elde edilir.

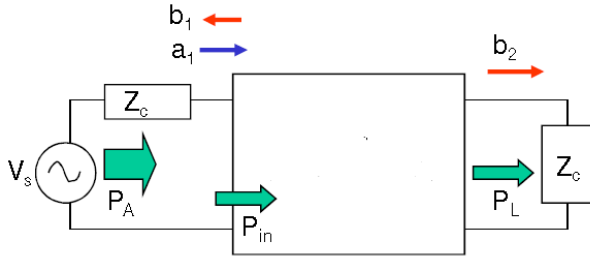
$$P_{LR} = 1 + \frac{M(\omega^2)}{N(\omega^2)} \quad (2.4)$$

Burada, $|\tau(\omega)|^2$, ω 'nın Fourier Transform'daki gerçek (real) fonksiyon değerini ifade etmektedir. M ve N değerleri ω^2 'nin polinomları olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Araya Girme Kaybı yöntemiyle filtre tasarımı [2]

İletilen ve yansıyan dalgalar bakımından $Z_L = Z_S = Z_C$ olduğu varsayılırsa (giriş ve çıkış empedansları uyumlanmış) Şekil 2.13'de gösterilen yapıda güç kaybı oranı S parametreleri ile Eş. 2.5'deki gibi ilişkilendirilebilir.



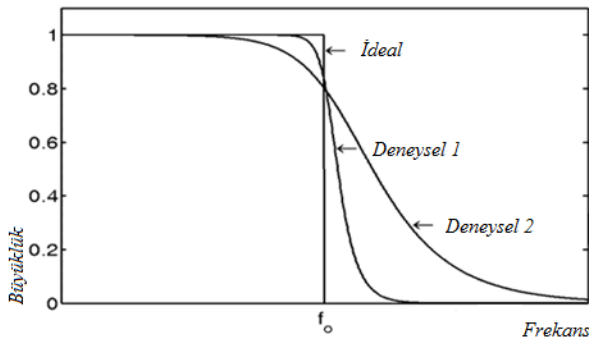
Şekil 2.13. Araya girme kaybı metodunda P_{LR} ve S_{21} ilişkisi

$$P_{LR} = \frac{P_A}{P_L} = \frac{\frac{1}{2}|a_1|^2}{\frac{1}{2}|b_2|^2} = \left| \frac{a_1}{b_2} \right|^2 = \frac{1}{|S_{21}|^2} \quad (2.5)$$

Bu eşitlikte, P_A = Kaynakta bulunan güç, P_L = Yüke aktarılan güç, a_1 = İletilen dalga, b_2 = Aktarılan dalga ve S_{21} = Araya girme kaybı değerlerini ifade eder.

2.3. Filtre Yaklaşım Metotları

Frekansın 0 ile f_0 arasındaki kazancının 1 olduğu ve f_0 üzerindeki tüm frekansların bastırıldığı ideal alçak geçiren filtre Şekil 2.14’de gösterilmiştir. Bu şekilde olan ideal filtreyi fiziksel olarak elde etmek mümkün değildir. Filtre tasarımlarında amaç ideal filtreye olabildiğince yakın olmaktır. Bunun için de farklı filtre metotları geliştirilmiştir. Bazı tasarımlarda iletim bandında mümkün olan en az bozulma istenirken durdurma bandında bu özellikten ödün verilebiliyor. Farklı tasarımlarda ise iletim bandından durdurma bandına keskin bir geçiş tercih edilebilir. Bunun karşılığında da iletim bandında daha fazla bozulma olur [5].



Şekil 2.14. İdeal ve deneysel alçak geçiren filtre cevapları

Bu tür tasarım ihtiyaçlarının karşılanması için farklı yaklaşım metotları geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar arasında en yaygın kullanımı olanlar; Maximally Flat, Chebyshev, Bessel ve Eliptik yaklaşımlarıdır. Bu çalışmada bu yaklaşımların karakteristik özelliklerine değinilmiştir.

2.3.1. Maximally Flat (Butterworth veya Binomial) yaklaşım

Butterworth ya da Binomial olarak da bilinen Maximally Flat yaklaşım metodu iletim bandında (Passband) mümkün olan en düzgün frekans cevabını verir. Bunun karşılığında da yavaş kesime gider (Şekil 2.15) .

Butterworth alçak geçiren filtre cevabı,

$$P_{LR} = 1 + k^2 \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^{2N} \quad (2.6)$$

biçiminde verilir. Burada; N : Filtre derecesi, ω : Açısal frekans ve ω_c : Kesim frekansını ifade eder.

P_{LR} 'nin $1 + k^2$ (iletim bandındaki dalgalanmayı ifade eder) olduğu aralıktaki iletim bandı $\omega = 0$ 'dan $\omega = \omega_c$ 'ye kadar devam eder (Şekil 2.15). Bu nokta eğer -3dB olarak kabul edilirse, k değeri 1 olarak bulunur. $\omega > \omega_c$ değerleri için bastırma oranı frekans artışıyla monolitik olarak artış gösterir. $\omega \gg \omega_c$ olduğu değerlerin ise P_{LR} değeri yaklaşık olarak $k^2(\omega / \omega_c)^2$ olarak tanımlanır. Bu da araya girme kaybının 20 dB/dekat oranında arttığını gösterir [5,10].

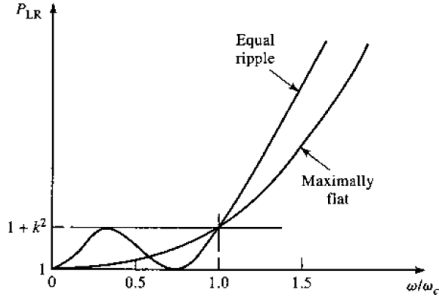
2.3.2. Chebyshev (Equal Ripple) yaklaşım

Chebyshev, iletim bandında dalgalanmaya durdurma bandında da azami düz bir yapıya sahiptir. N . dereceden bir Chebyshev polinomlu filtre tasarımı yapılmak istenirse,

$$P_{LR} = 1 + k^2 T_N^2(\omega) \quad (2.7)$$

eşitliği kullanılır [5,10]. Burada $T_N(\Omega) = \begin{cases} \text{Cos}(n \cos^{-1} \Omega) & \Omega \leq 1 \\ \text{Cosh}(n \cosh^{-1} \Omega) & \Omega > 1 \end{cases}$

ile gösterilir.



Şekil 2.15. Equal Ripple ve Maximally Flat yaklaşımlarının karşılaştırılması

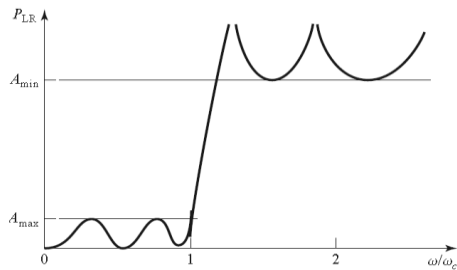
2.3.3. Eliptik (Elliptic - Cauer) yaklaşım

Bu çalışmada bahsedilen yaklaşımlar arasında Eliptik filtre yaklaşımı iletim bandından durdurma bandına geçişte en hızlı geçişi sağlar. Bunun karşılığında ise Eliptik filtrenin iletim bandında da durdurma bandında da dalgalanma görülür. Örnek bir Eliptik yaklaşımla tasarlanmış filtrenin büyüklük cevabı Şekil 2.16'da görülmektedir. Eliptik filtre aynı zamanda geliştirilmesi en zor olan yaklaşımlardan biridir [5,10].

Eliptik polinomlu filtre tasarımı için,

$$P_{LR} \approx \frac{k^2}{4} \left(\frac{2\omega}{\omega_c} \right)^{2N} \quad (2.7)$$

eşitliği kullanılır.



Şekil 2.16. Eliptik yaklaşımın gösterimi

3. ALÇAK GEÇİREN FİLTRE TASARIMI VE BENZETİMİ

Mikroşerit alçak geçiren filtre tasarımları genel olarak iki ana adımdan oluşur. Bunlardan birincisi, uygun bir alçak geçiren filtre prototipinin belirlenmesidir. Frekans cevabının seçimi, iletim bandındaki dalgalanma ve reaktif elemanların sayısı, ihtiyaç duyulan filtre parametrelerine bağlıdır. Alçak geçiren filtre ilk örneğinin eleman değerleri istenilen kesim frekansı ve kaynak empedansının (mikroşerit uygulamalar için genelde 50 ohm) sağlanması için L - C elemanlarına dönüştürülür. İkinci önemli adım ise, elde edilen L - C elemanlı devre ile uygun mikroşerit gerçekleştirilmesinin uygulanmasıdır [3,11,12].

Sinüzoidal gerilim ve akımla filtreler enerjilenerek çıkış cevabı elde edilir. Filtre karakteristiğini anlamak için ise çıkışta alınan frekans cevaplarını yorumlamanın farklı metotları mevcuttur. Bu metotlar ise;

- Transfer Fonksiyonu - $H(\omega)$ (geleneksel yaklaşım)
- Bastırma Faktörü $A(\omega)$.
- S - Parametreleri, örneğin $S_{21}(\omega)$
- Diğerleri, $ABCD$ Parametreleri ve benzerleri [2].

şeklinde tanımlanabilir.

Bu çalışmada S parametreleri kullanılarak filtre tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir.

3.1. Alçak Geçiren Prototip Chebyshev Filtre Teorisi

İletim dalgalanması olan L_{Ar} dB ve kesim frekansı $\Omega_c = 1$ olan alçak geçiren chebyshev filtre,

$$|S_{21}(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_N^2(\Omega)} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\frac{L_{Ar}}{10}} - 1} \quad (3.2)$$

fonksiyonları ile tanımlanır [3].

İki kapılı (portlu) devre elemanları,

$$g_0 = 1.0$$

$$g_1 = \frac{2}{y} \sin\left(\frac{2}{2n}\right)$$

$$g_i = \frac{1}{g_{i-1}} \frac{4 \sin\left[\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right] \cdot \sin\left[\frac{(2i-3)\pi}{2n}\right]}{y^2 + \sin^2\left[\frac{(i-1)\pi}{n}\right]} \quad i = 2, 3, \dots, n \text{ için} \quad (3.3)$$

$$g_{n+1} = \begin{cases} 1.0 & n \text{ tek için} \\ \coth^2\left(\frac{\beta}{4}\right) & n \text{ çift için} \end{cases}$$

$$\beta = \ln\left[\coth\left(\frac{L_{Ar}}{17.37}\right)\right]$$

$$y = \sinh\left(\frac{\beta}{2n}\right)$$

biçiminde tanımlanır [13,14]. Burada, g_0 ve g_n arası değerler, eleman değerlerini ifade etmektedir. Örneğin 5. dereceden bir filtre tasarımında N değeri 5, eleman değeri de 5 olacağından, g_0 'dan g_5 'e kadar değerler hesaplanabilir.

Çizelge 3.1'de farklı L_{Ar} değerleri ve n değerinin 1'den 9'a kadar farklı değerleri için eleman değerleri listelenmiştir.

Çizelge 3.1. Chebyshev alçak geçiren filtrenin eleman değerleri ($g_0 = 1.0$ (kaynak empedansı), $\Omega_c = 1$ (kesim frekansı)) [3]

İletim dalgalanması $L_{Ar} = 0.01$ dB										
n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	0.0960	1.0								
2	0.4489	0.4078	1.1008							
3	0.6292	0.9703	0.6292	1.0						
4	0.7129	1.2004	1.3213	0.6476	1.1008					
5	0.7563	1.3049	1.5773	1.3049	0.7563	1.0				
6	0.7814	1.3600	1.6897	1.5350	1.4970	0.7098	1.1008			
7	0.7970	1.3924	1.7481	1.6331	1.7481	1.3924	0.7970	1.0		
8	0.8073	1.4131	1.7825	1.6833	1.8529	1.6193	1.5555	0.7334	1.1008	
9	0.8145	1.4271	1.8044	1.7125	1.9058	1.7125	1.8044	1.4271	0.8145	1.0
İletim dalgalanması $L_{Ar} = 0.04321$ dB										
n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	0.2000	1.0								
2	0.6648	0.5445	1.2210							
3	0.8516	1.1032	0.8516	1.0						
4	0.9314	1.2920	1.5775	0.7628	1.2210					
5	0.9714	1.3721	1.8014	1.3721	0.9714	1.0				
6	0.9940	1.4131	1.8933	1.5506	1.7253	0.8141	1.2210			
7	1.0080	1.4368	1.9398	1.6220	1.9398	1.4368	1.0080	1.0		
8	1.0171	1.4518	1.9667	1.6574	2.0237	1.6107	1.7726	0.8330	1.2210	
9	1.0235	1.4619	1.9837	1.6778	2.0649	1.6778	1.9837	1.4619	1.0235	1.0
İletim dalgalanması $L_{Ar} = 0.1$ dB										
n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	0.3052	1.0								
2	0.8431	0.6220	1.3554							
3	1.0316	1.1474	1.0316	1.0						
4	1.1088	1.3062	1.7704	0.8181	1.3554					
5	1.1468	1.3712	1.9750	1.3712	1.1468	1.0				
6	1.1681	1.4040	2.0562	1.5171	1.9029	0.8618	1.3554			
7	1.1812	1.4228	2.0967	1.5734	2.0967	1.4228	1.1812	1.0		
8	1.1898	1.4346	2.1199	1.6010	2.1700	1.5641	1.9445	0.8778	1.3554	
9	1.1957	1.4426	2.1346	1.6167	2.2054	1.6167	2.1346	1.4426	1.1957	1.0

Tasarlanan filtre için ihtiyaç duyulan iletim bandı dalgalanması L_{Ar} , minimum durdurma bandı bastırma oranı L_{As} dB ve minimum bastırma oranı frekansı Ω_s değerleri için filtrenin derecesi n ,

$$n \geq \frac{\cosh^{-1} \sqrt{\frac{10^{0,1L_{As}-1}}{10^{0,1L_{Ar}-1}}}}{\cosh^{-1} \Omega_s} \quad (3.4)$$

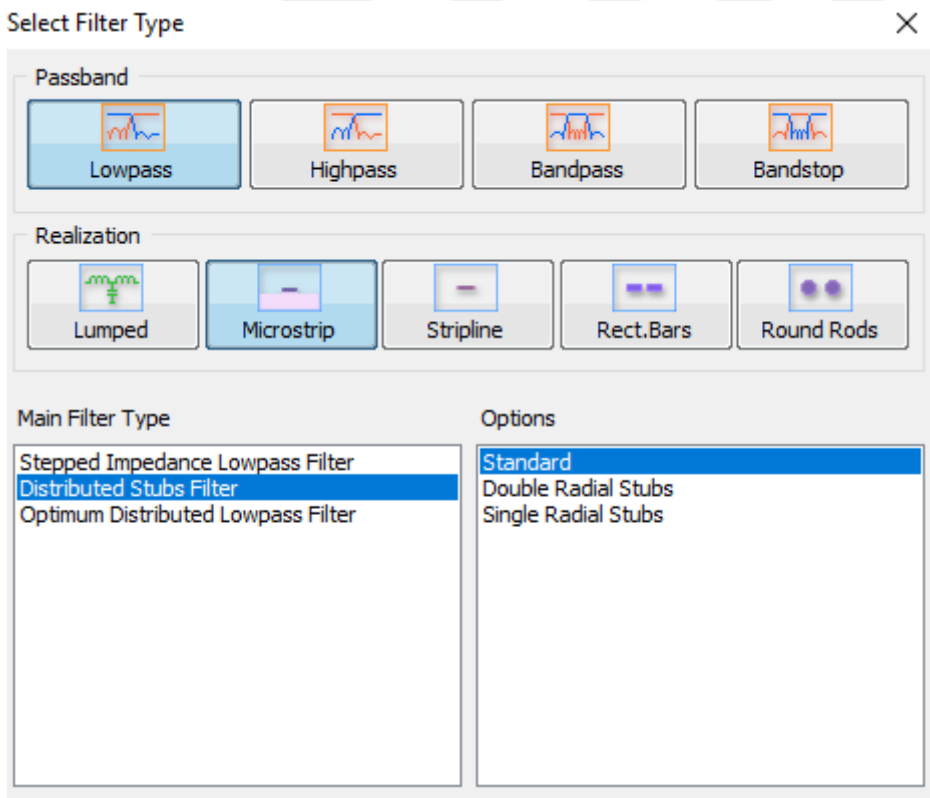
ifadesi ile bulunur.

Örneğin ; $L_{As} \geq 40$ dB, $\Omega_s = 2$ ve $L_{Ar} = 0,1$ dB Chebyshev için n değeri ; $n \geq 5,45$ olduğundan 6. derece olarak belirlenir [3].

3.2. Pasif Alçak Geçiren Mikroşerit LC Filtre Tasarımı

Filtrenin tasarımı için AWR Sonnet programı tercih edilmiştir. Bu program ile istenilen filtre tipi, yaklaşım metodu, kesim frekansı ve filtre derecesi gibi önemli bilgiler girilerek filtrenin benzetimi yapılarak istenilen filtre cevabının elde edilip edilemeyeceği görülmektedir [15].

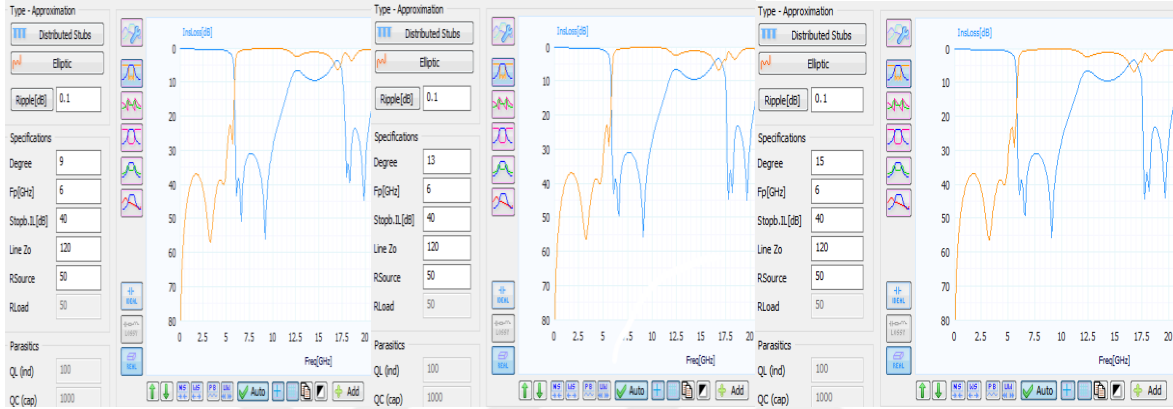
Tasarlanacak filtrede kullanılacak alttaşın dielektrik sabiti $\epsilon_r = 9,8$ ve kalınlığı $d = 10$ mil olarak seçilmiştir. İnce film teknolojisi ile üretimde kullanılabilen en uygun malzeme alümina olduğundan, alttaş olarak alümina tercih edilmiştir. Ayrıca, bu teknolojiye çok yaygın olmasa da 5 mil ve 20 mil alümina seçenekleri de mevcuttur. Alumina kalınlığı frekans üst sınırını belirler. Tabaka incelidikçe üst limit frekanslarında tasarımlar gerçekleştirilebilir. Bu tasarımlarda kullanılan 10 mil kalınlık istenilen frekans çalışma aralığı için yeterlidir. Ayrıca, 5 mil alümina kullanımında kalınlığın çok ince olmasından kaynaklı üretim işlemleri daha farklıdır ve 10 mile göre uygulanması çok daha zordur. Kullanılacak malzeme bilgisi girildikten sonra Şekil 3.1’de görüldüğü gibi tasarlanmak istenen filtre tipi ve yapısı seçilir ve ilerlenir. Bu çalışma için alçak geçiren filtre (lowpass) ve mikroşerit yapı (microstrip) seçilmiştir. Ana filtre tipi (Main Filter Type), Ayrık filtre (Distributed Stubs Filter) olarak seçilmiştir, opsiyon olarak da standart tip seçilmiştir [15,16].



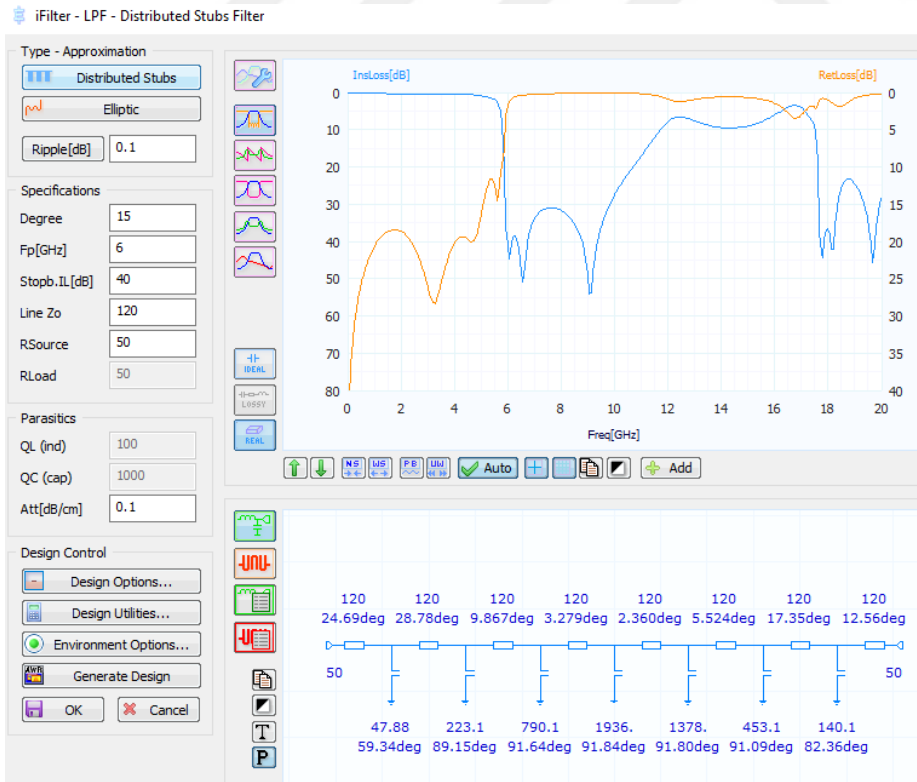
Şekil 3.1. Filtre tipinin seçilmesi

Filtre tipinin belirlenmesinden sonra önemli bir işlem basamağı ise tasarlanmak istenilen filtrenin hangi yaklaşımla yapılacağına karar verilmesidir. Yaygın olan filtre

karakteristiklerinden Eliptik filtre seçimi uygulandıktan sonra Şekil 3.2’de görülen arayüzdeki gibi istenilen parametre değerleri ve farklı “n” dereceleri girilerek en düzgün filtre cevabı belirlenmeye çalışılmıştır. Eliptik filtre yapısında “n” derecesinin artırılmasının filtre frekans cevabında önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. İhtiyaç duyulan parametre değerlerine en yakın olan 15. dereceden filtre tasarımı Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

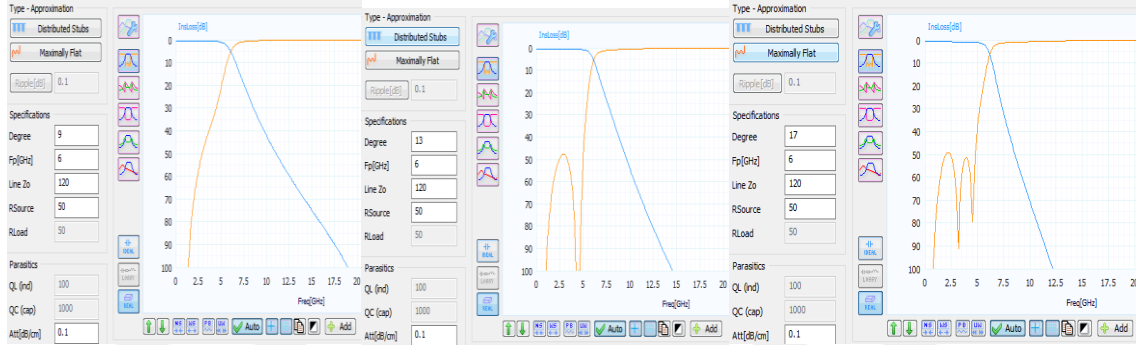


Şekil 3.2. Eliptik filtre için sırasıyla 9. 13. ve 15. dereceden filtre tasarımları



Şekil 3.3. Eliptik filtre yaklaşımı ile AWR tasarımı

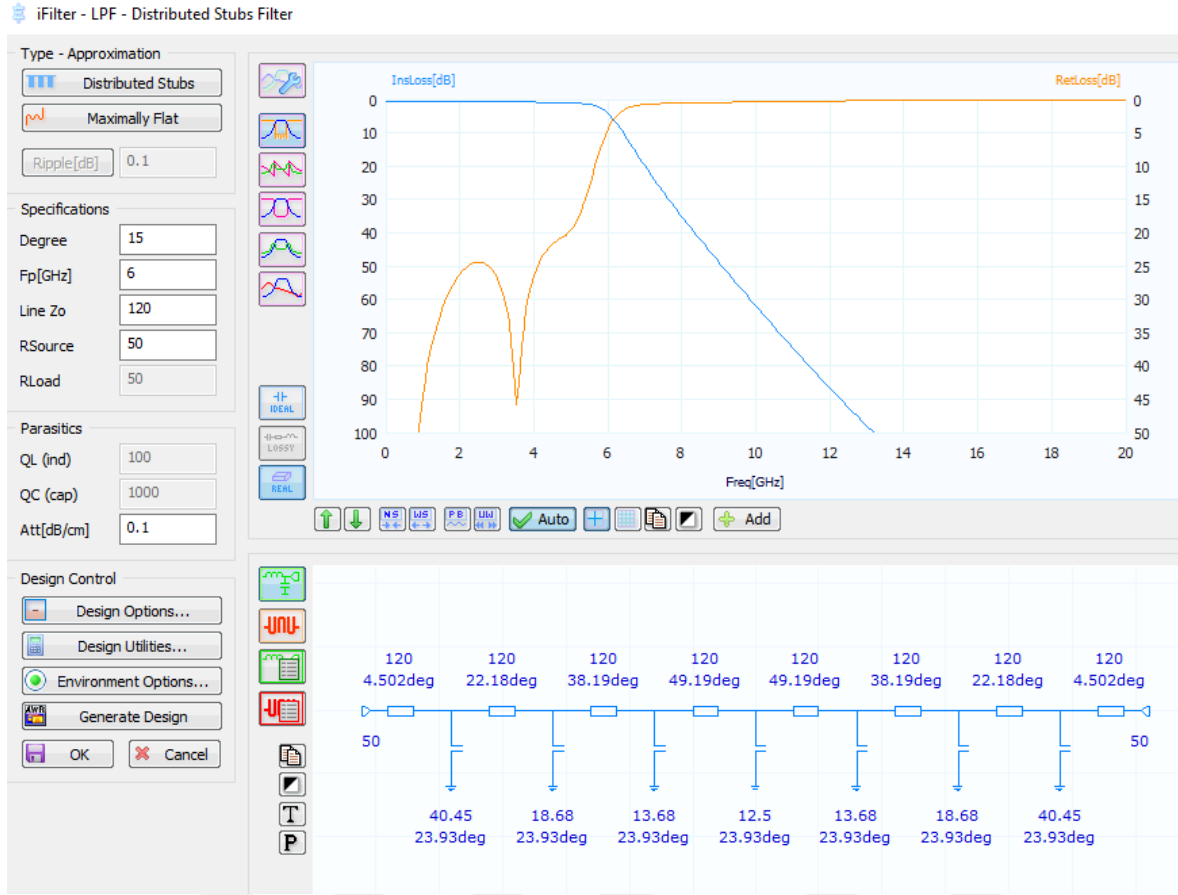
Şekil 3.3’de gösterilen grafiğe göre filtre iletim bandından durdurma bandına hızlı bir şekilde kesime gitmektedir. Ancak geniş durdurma bandı ihtiyacını tam olarak karşılamamaktadır. 10 GHz frekansından sonra daha düşük bastırma oranları elde edilmiş olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. Maximally Flat filtre için sırasıyla 9. 13. ve 17. dereceden filtre tasarımları

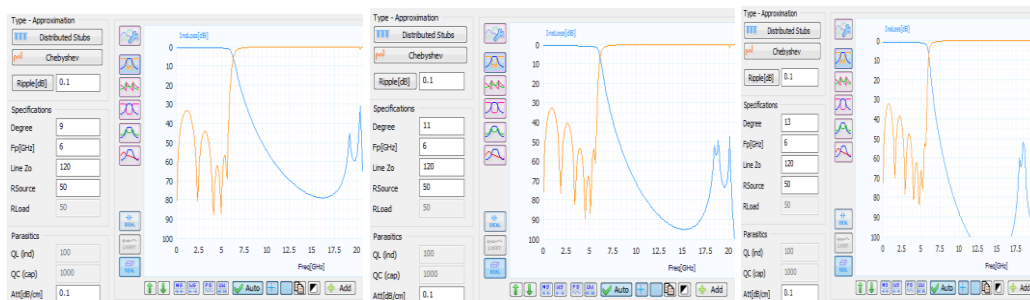
Filtre yaklaşımlarından Maximally Flat seçilerek Şekil 3.4’de görülen farklı “n” dereceleri seçilerek etkisi gözlenmiştir. Filtre derecesi arttıkça filtrenin 6 GHz’de kesime gidiş eğrisinin düzeldiği görülmüştür. 15. derecenin filtre ihtiyaçlarına göre en iyi sonuç olduğu belirlenmiştir.

Şekil 3.5’de görülen yeni tasarım gerçekleştirilmiştir. Ancak yine de elde edilen filtre cevabında görüldüğü gibi filtre iletim bandından durdurma bandında geçişte hızlı kesime gidemiyor. Bu filtre yaklaşımı ile elde edilen sonuçta çok yüksek bastırma ve geniş bant elde edilmesine rağmen istenilen kesim değeri elde edilmediğinden bu yaklaşım da tercih edilmemiştir [17].



Şekil 3.5. Maximally Flat filtre yaklaşımı ile AWR tasarımı

Mikrodalga filtrelerde yaygın olan bir diğer yaklaşım metodu olan Chebyshev seçimi uygulanarak Şekil 3.6'daki farklı "n" derecelerine göre tasarımlar gerçekleştirildi. Filtre derecesinin artırılmasıyla yüksek bastırma oranı ve hızlı kesim olduğu gözlenmiştir. Bastırma oranı arttıkça aygıt sayısı artacağından ve filtrenin fiziksel boyutları küçüleceğinden üretimi zorlaşacaktır. Bu parametrenin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

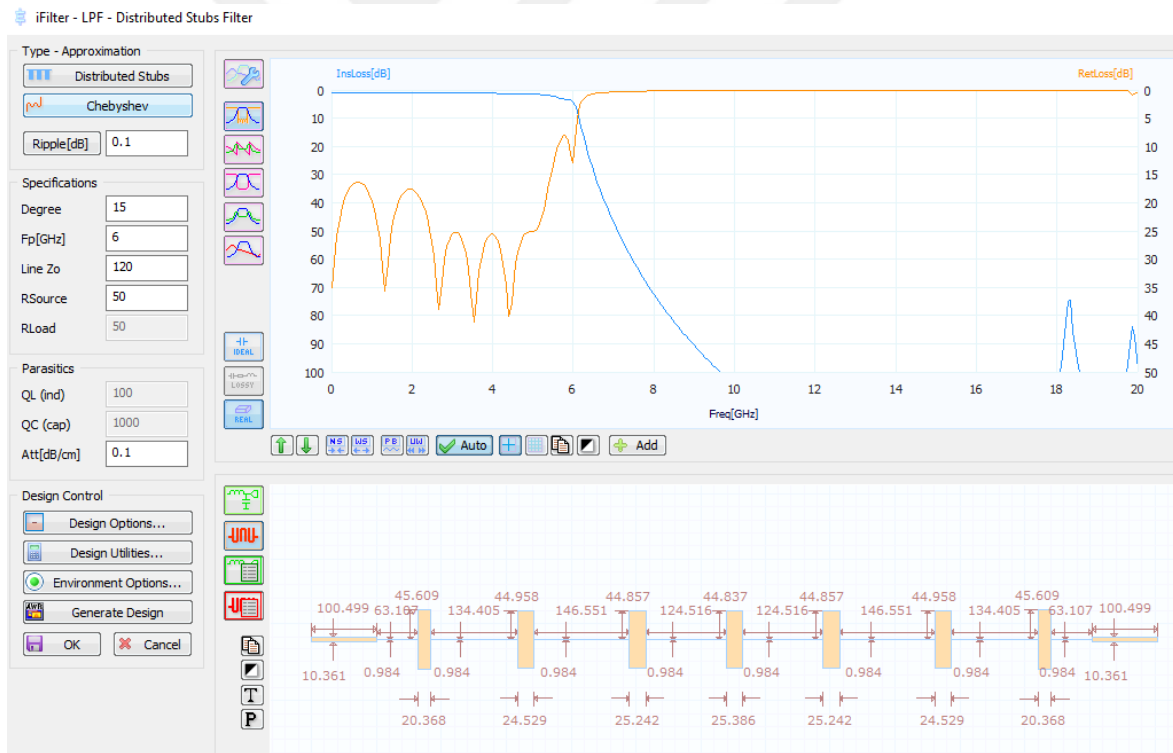


Şekil 3.6. Chebyshev filtre için sırasıyla 9., 11. ve 13. dereceden filtre tasarımları

Bu yaklaşım için en iyi sonuç 19. derecede görülmüştür. Şekil 3.7’de görülen filtre cevabı elde edilmiştir. Chebyshev ile elde edilen sonuç filtre ihtiyaçlarını karşılamaktadır.

Bu tasarımda diğer önemli bir konu, tasarlanan filtrenin üretime uygun olup olmadığıdır. İnce film üretiminin tasarım kurallarında en düşük hat kalınlığının limiti 1 mildir (1 mil = 25,4 μ m). 1 milin altındaki hatlarda üretim mümkün olmadığından, üretilmesi halinde tasarım ölçümlerinin dışına çıkarılır. Bu nedenle, hat kalınlığının ölçüsü de dikkate alınarak tasarım çıktıları değerlendirilmiştir.

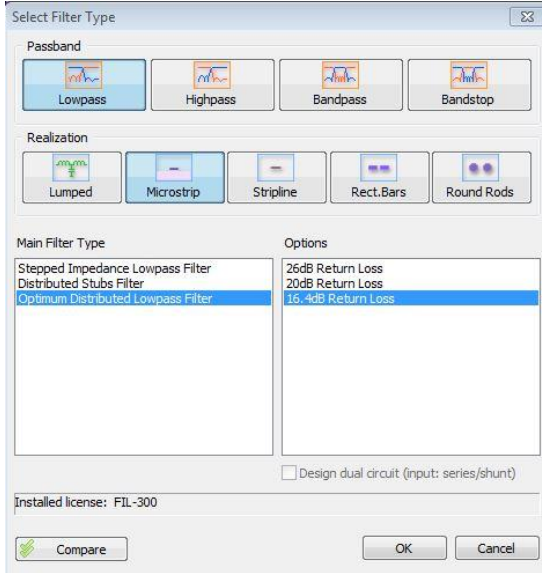
Elde edilen tasarımda en ince hat kalınlığı 0,984 mil olduğundan üretim açısından riskli bulunmuştur. Ancak Chebyshev yaklaşımının başka yapılarından oluşan tasarımlara devam edilmiştir.



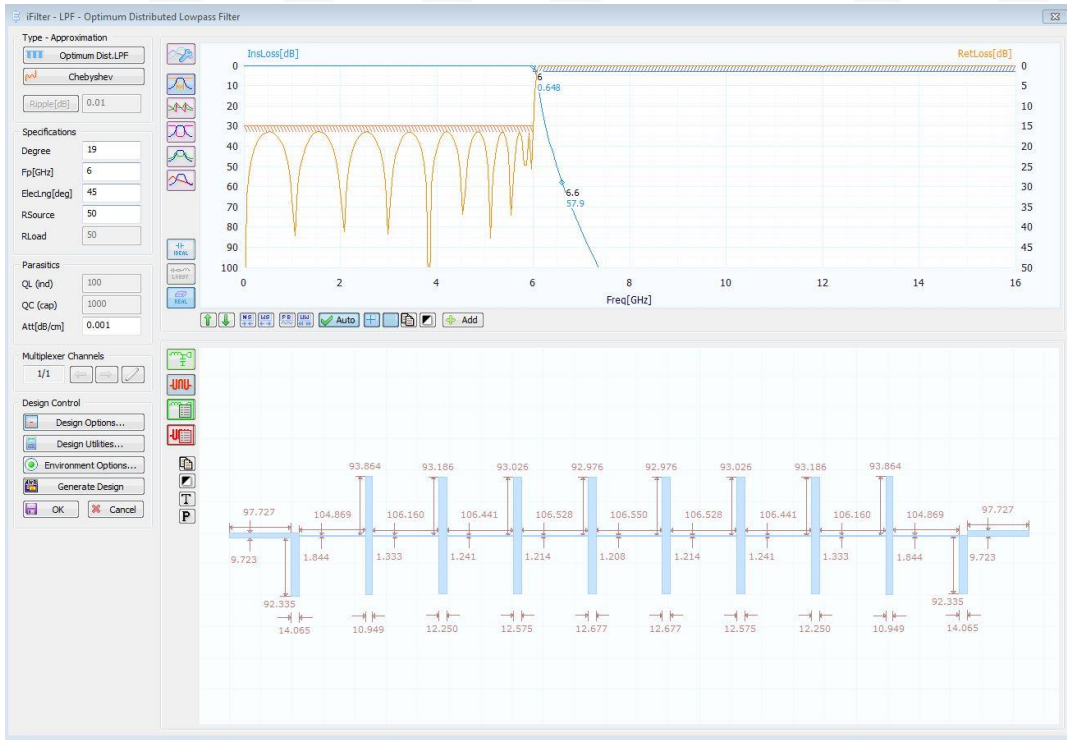
Şekil 3.7. Chebyshev yaklaşımı ile AWR tasarımı

AWR programının Şekil 3.8’de görüldüğü gibi ana filtre tipi seçiminde kendi içinde uyarlamasıyla en iyi parametreleri bulduğu opsiyonu olan “Optimum Distributed Lowpass Filter” seçimi ile Şekil 3.9’da görüldüğü gibi hızlı kesime giden, yüksek bastırma oranına sahip ve de üretim açısından daha az risk oluşturacak hat inceliğine sahip bir tasarım elde

edilmiştir. En ince hat kalınlığı 1,2 mil olduğundan üretim bakımından halen risk içermektedir. Ancak elde edilen sonuçlar arasından en iyi tasarım olmasından dolayı üretimine karar verilmiştir [18-25].



Şekil 3.8. Filtre tipinin seçilmesi (Optimum Distributed Lowpass Filter)



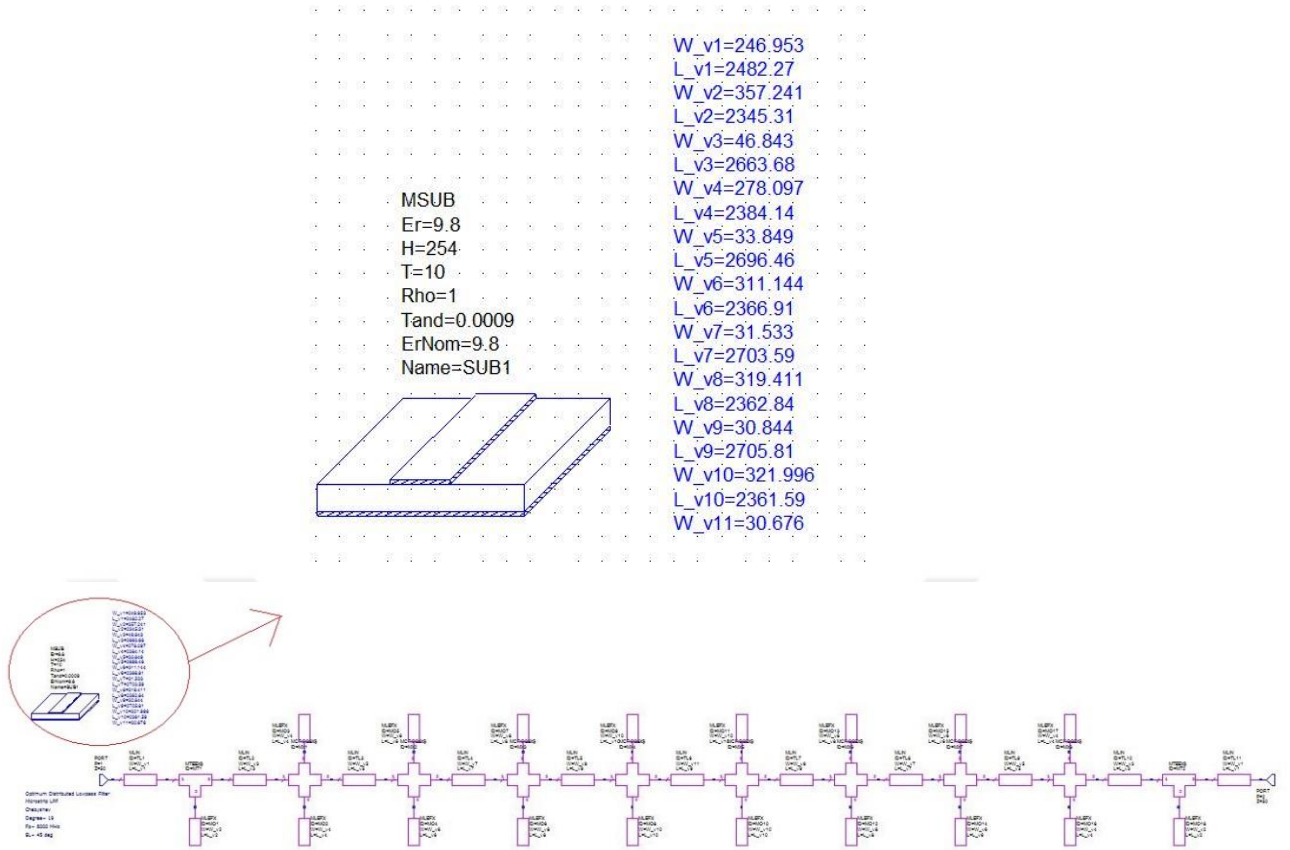
Şekil 3.9. Chebyshev yaklaşımı ile AWR tasarımı (Optimum Distributed Lowpass Filter)

Şekil 3.9’da görülen arayüzde, seçilen filtrenin parametre değerlerinin girilmesi istenir. Bu çalışmada 6 GHz’de kesime giden ve 6,6 GHz’de 50 dB bastırmaya sahip bir filtre tasarımı istendiğinden kesim frekansı 6 GHz olarak seçilip filtre cevabının görülerek 6,6 GHz’e konulan işaretleyicinin bastırma oranı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada istenilen bastırma oranı yüksek olduğundan programın son filtre derecesi olan 19. derece seçilerek devam edilmiştir. Buna rağmen en yüksek değer olarak bastırma değeri 57,9 dB olarak elde edilmiştir. Teoride çıkan değerler pratikte birebir uygulanamadığından, 57,9 olarak çıkan değer uygulamadan sonra düşeceği öngörüldüğünden bu değerlerde tasarlanan filtrenin üretilmesine ve ölçülmesine karar verilmiştir.

Şekil 3.9’un sol tarafında görülen parametrelerden “Filtre Derecesi (Degree), Kesim Frekansı (Fp), ve Kaynak Empedansı” (Rsource – giriş ile uyumlanması için 50 ohm olarak seçilmiştir) değerleri girilerek “Tasarımı Oluştur” (Generate Design) seçilmiştir ve sağ üstte görülen filtre cevabı ve sağ altta görülen filtre yapısı elde edilmiştir. Filtre yapısında görülen ölçüm değerleri mil cinsinden verilmiştir. Şekil 3.7’de görülen değerlerde yapılan tasarımda en ince hat kalınlığı 1,2 mil olarak görülmektedir.

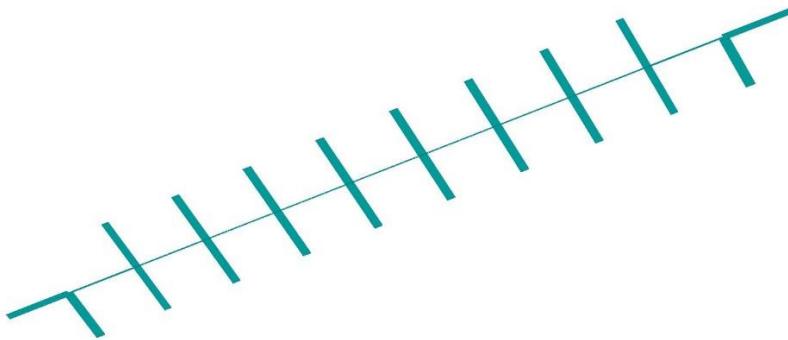
Şekil 3.9’da sağ altta verilen filtre yapısının ölçüm detayları Şekil 3.10’da görülebilir. Burada “L” uzunluğu ve “W” genişliği ifade etmektedir.

Yapılan filtre tasarım sonuçların benzetim ile uyumlu olduğu ve üretilmesinin uygun olduğu gözlenmiştir.



Şekil 3.10. Filtre yapısının fiziksel devre şeması

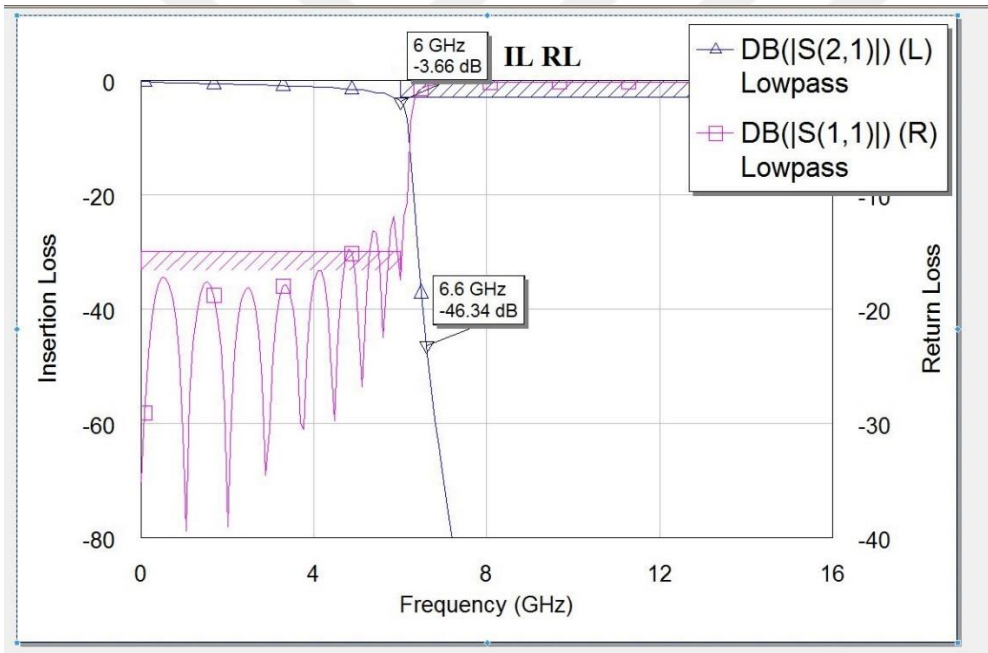
Tasarlanan filtrenin 2 boyutlu görsel yapısı Şekil 3.11'de görüldüğü gibidir. Bu desen altına üzerine oturtularak filtrenin üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.11. Tasarlanan filtrenin 2 boyutlu görseli (iletken kısmı)

3.3. AWR Filtre Benzetim Sonuçları

Önceki bölümde tasarımı gerçekleştirilen mikroşerit alçak geçiren Chebyshev filtrenin üretiminin yapılmadan önce AWR programının yardımcı aracı olan Axiem Tool ile benzetimi gerçekleştirilerek S_{21} (araya girme kaybı – insertion loss) ve S_{11} (geri yansımaya kaybı – return loss) parametreleri incelenmiştir. Gerçek ölçümlere yakın olan bu benzetimde Şekil 3.12’de görüldüğü gibi 6,6 GHz’de 57,9 dB olarak elde edilen başlangıç bastırma oranınının 46,34 dB olduğu görülmüştür. Tahmin edildiği gibi düşen bu değer gerçek ölçümler alındığında daha da aşağı düşeceği öngörülmüştür. Üretimi yapılan filtrenin, tasarımında ortaya çıkan fiziksel boyutlarında (genişlik ve uzunluk) önemli bir sapma olmadan üretilebilmesiyle, kayıplar en aza indirilmiş ve istenilen değerlere ulaşılabilmiştir.



Şekil 3.12. AWR Axiem Tool ile alınmış benzetim sonucu

Bir diğer önemli husus ise tasarımda 6 GHz’de 0,648 dB olan kaybın benzetimde 3,66 dB’ye çıkmasıdır. Bu değer kabul edilebilir sınırlar dahilinde olduğundan üretilmesi uygun görülmüştür.

4. İNCE FİLM TEKNOLOJİSİ İLE MİKROŞERİT FİLTRE ÜRETİMİ

4.1. İnce Film Teknolojisi

Elektronik Aygıt teknolojisinde çok önemli bir yere sahip olan İnce Film Aygıtlar son yıllarda Elektronik sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Küçük boyutlu olması, yüksek performans göstermesi ve üretim maliyetinin düşük olmasından dolayı günümüz teknolojisinde önemli bir yer edinmiştir. Teknoloji geliştikçe İnce Film Aygıtların üretiminde farklı yöntemler gelişmiştir. Farklı yöntemlerin arayışı, yüksek performans, düşük maliyet ve küçük boyut gibi ihtiyaçlardan kaynaklanmaktadır [4].

İnce film filtrelerin Toplu Eleman ve Dağınık tasarımlar olmak üzere iki ana formu mevcuttur. Toplu Eleman tasarımların 500 MHz – 5 GHz aralığında, Dağınık tasarımların da 1 GHz – 100 GHz aralığında daha uygun olduğu genel bir kural olarak kabul edilir. Toplu Eleman tasarım filtreleri, bileşen boyutu yüksek kritik frekanslardaki dalga boyundan daha küçük olan ayırık endüktör ve kapasitelerden oluşur. Tanım gereği Dağınık tasarımı, en büyük dalga boyundan daha büyük boyutlara sahiptir. Toplu Eleman tasarımın katman yapısı Entegre Pasif Aygıtların (EPA) bir versiyonudur. EPA tasarımlar cam, kuartz ya da Si (Silisyum) alttaşlardan oluşur. Dağınık tasarımlar da genellikle alümina üzerine şerit çizgi şeklinde ya da eş düzlemlili dalga kılavuzu yapısı ile Cu (Bakır) , Au (Altın) ve Ni (Nikel) iletken olan yapılardır.

Bu çalışma ile üretilecek olan filtreler Dağınık tasarıma sahip olup, alümina üzerine şerit çizgi şeklinde Au kaplama uygulanmıştır. Sonraki bölümde, tasarlanan mikrodalga filtrenin üretiminde kullanılan İnce Film Üretim yöntemlerinin detaylarına yer verilmiştir.

4.2. İnce Film Üretim Adımları

Temelde İnce Film Üretimi, elektro-kaplama ile kalın iletken tabakalar (Cu, Au, Ni vb.) elde etmek için vakum işlemlerinin (püskürtme, CVD, evaporation vb.) uygulanmasıdır. Bu uygulamada elde edilen tabaka litografi ile aşındırma (Etch – Subtractive Process) veya biriktirme (Plating – Additive Process) işlemlerinden geçirilir. İnce film filtrelerin en önemli

avantajı küçük aygıtların üretiminde benzer teknolojilerle kıyaslandığında yüksek güvenilir teknolojiye sahip olmasıdır [4].

4.2.1. Püskürtme ile kaplama

Vakuma alınmış kabin içerisinde üretilen iyonlar hedef üzerine gönderilerek hedef atomlarının kopması ve alttaş üzerine transferi durumu Püskürtme ile Kaplama yöntemi olarak adlandırılır.

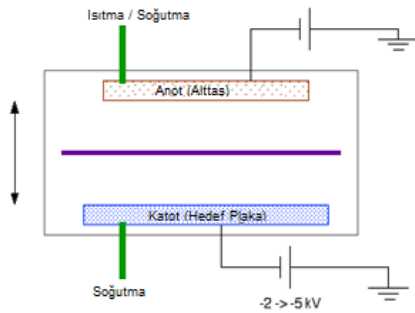
- Parlama tüpüne yüksek gerilim uygulanarak iyonik bir plazma oluşur.
- Katotta bulunan hedef malzemeye iyonik bombardıman gerçekleşir.
- Enerji ve momentum transferi ile hedef malzeme atomları koparılır.
- Hedeften koparılan atomlar alttaş (anot) üzerinde birikir.

DC Püskürtme ve AC Püskürtme olmak üzere iki farklı püskürtme yöntemi mevcuttur.

DC Püskürtme

Katoda DC gerilim uygulanarak gerçekleştirilir. Metalik alttaşlar için uygundur. Bir metal yerine, quartz gibi bir yalıtıkana kaplama yapılacağı varsayılınsın. Hedef malzemenin yüksek direnç değerinden dolayı, kayda değer bir akım akabilmesi için mümkün olmayan bir gerilim değeri ($\sim 10^{12}$ V) gerekir. Akım akmamasından dolayı plazma gerçekleşemeyecek ve işlem duracaktır. Bundan dolayı, işlem $10^6 \Omega$ direnç değerinden küçük malzemeler (yalıtkan olmayan) ile sınırlıdır. DC Sputtering Mekanizması Şekil.4.1'deki gibidir.

- Yüksek basınçlarda çalışılmalıdır.
- Gazın yalnızca küçük bir kısmı iyonlara dönüştürülür.
- Kaplama hızı oldukça düşük.

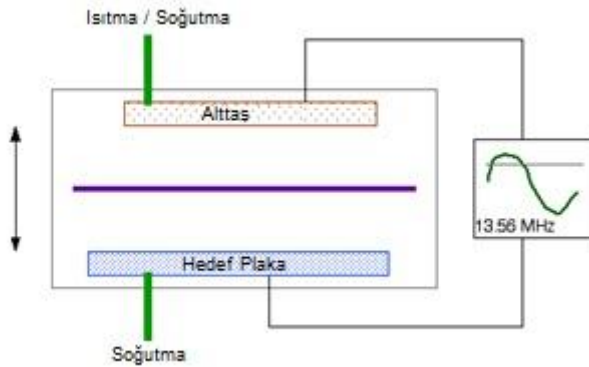


Şekil 4.1. Püskürtme (Sputtering) mekanizması (DC)

RF Püskürtme

Katoda DC gerilim uygulamak yerine, 13,56 MHz civarında RF salınımlı gerilimi uygulanır. RF peak to peak gerilimi 1000V, elektron yoğunluğu 10^9 - 10^{11} cm^{-3} ve kabin basıncı 0,5 – 10 mTorr değer aralığındadır. Pozitif çevrimde elektronlar katot ile etkileşime geçer, negatif sapma oluşturur (hedef yüzey üzerinde negatif yükün oluştuğu düşünülebilir). Negatif çevrimde de iyon bombardımanı devam eder. RF Püskürtme (Sputtering) Mekanizması Şekil.4.2'deki gibidir.

- Katotta sabit bir negatif gerilim uygulamaktan kaçınarak, yalıtkan hedeflerde iyon artışı önlenir.
- Düşük basınçlarda çalışabilir.
- DC plazma katot ile sınırlıyken, RF plazma tüm hazneyi doldurma eğilimindedir.
- Normalde hedef ve alttaşa yönelik püskürtme yapılır. Hedef alanı alttaştan küçük tutularak bu durum giderilebilir.
- Herhangi bir film çeşidi RF püskürtme edilebilirken, birikim oranı bunda da aynıdır.



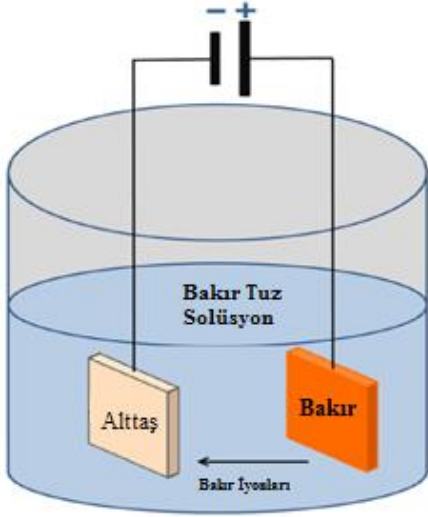
Şekil 4.2. Püskürtme (Sputtering) mekanizması (RF)

4.2.2. İnce Film Biriktirme

Fotolitografi'de ıslak aşındırmanın ilk adımıdır. İnce film biriktirme, elektrik akımı uygulanarak metalik bir yüzeye kaplama yapma yöntemidir. Alttaşa metalik bir kaplama yapılabilmesi için, ya alttaş üzerinde metalik bir tabaka olmalı ya da alttaşın kendisi metalik olmalıdır. Kaplanacak alttaş negatif (katot) ve bir metalik cisim pozitif (anot) olarak yüklenir. Her ikisi de metal solüsyonuna daldırılır. Solüsyondaki metalik iyonlar pozitif

yükleneceğinden dolayı, katot objeye doğru hareketlenirler, böylece alttaş solüsyonda bulunan metal ile kaplanmış olur.

Şekil.4.3’de görüldüğü gibi, alttaş Cu solüsyonuna daldırılarak negatif olarak yüklenmiştir ve pozitif yüklenmiş bir cisim daldırılarak elektroliz uygulanmıştır. Bu durumda alttaş, Cu iyonları ile temasa geçeceğinden, Cu tabaka ile kaplanacaktır.



Şekil 4.3. Alttaşın bakır ile elektroliz edilmesi

4.2.3. Fotolitografi (Photolithography)

Fotolitografi bir deseni alttaş üzerine aktaran optik bir işlemdir. Kısaca desen transferi işlemi olarak adlandırılabilir. Baskı devre kartlarının desen oluşumu için de benzer bir yöntem uygulanır. Bu yöntem birçok teknolojiye yaygın olarak kullanılır.

Fotolitografi (desen baskı) sırasıyla,

- Yüzey hazırlığı,
- Fotorezist kaplama,
- İlk pişirme,
- Hizalama/Maruz kalma/ Banyo,
- Son pişirme,
- Fotorezistin maske olarak kullanılması,
- Soyma,
- Külleme,

adımlarından oluşur [6].

Yüzey hazırlığı

İnce Film Biriktirme yöntemleri ile hazırlanan alttaş üzerine uygulanır. Alttaşa, elektrokaplama öncesi püskürtme ile ince bir metalik tabaka kaplanır ve elektrokaplama uygulanır. Ya da metalik yüzeye sahip hazır bir alttaş, elektrokaplama ile kaplanıp fotolitografi için hazırlanır.

Fotorezist kaplama öncesi temizlenmesi gereken tipik kirlilikler :

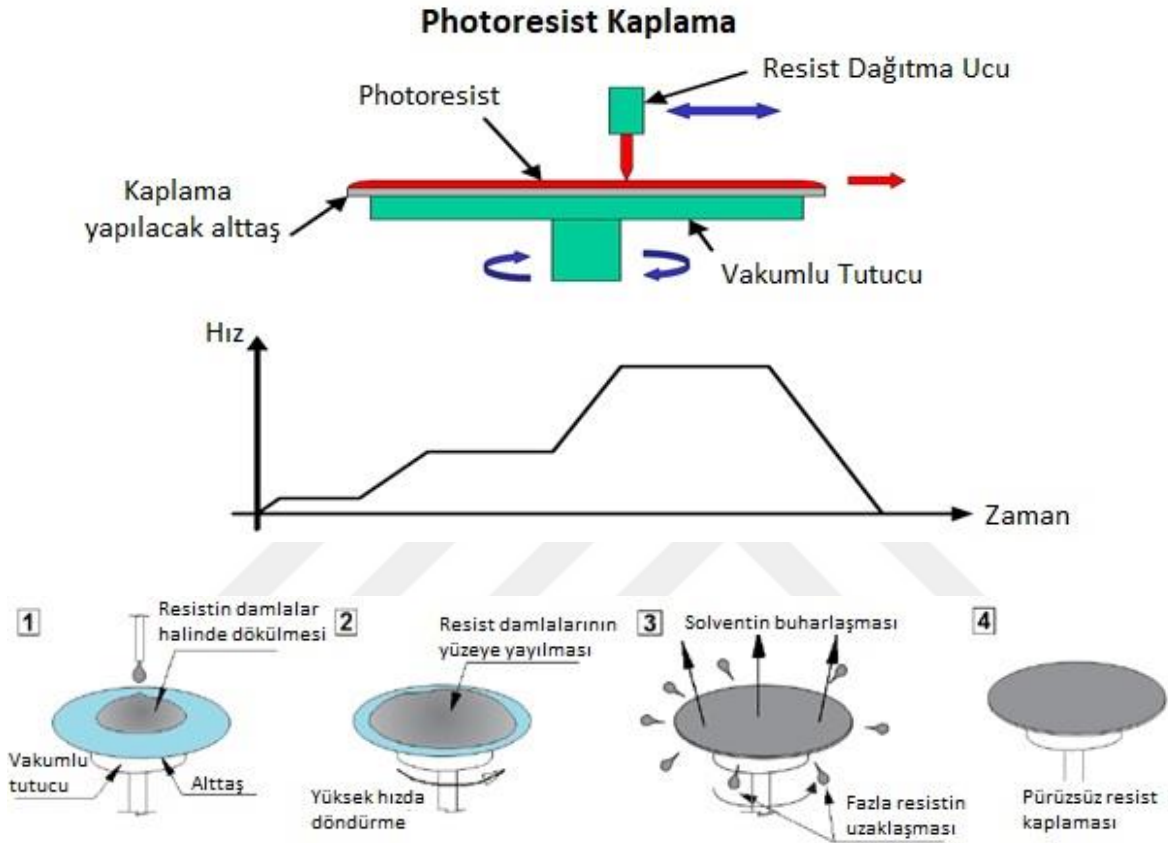
- Sivri uç ile çizme ve dilinimden kaynaklı tozlanma (Lazer toz ile minimize edilebilir)
- Atmosferik tozlar (Temiz Oda kullanımı ile minimize edilebilir)
- Abrasif partiküller (Parlatmadan kaynaklı)
- Temizlik bezlerinin iplik tiftiği (tiftiksiz bezler kullanılarak minimize edilebilir)
- Önceki fotolitografiden kalan fotorezist kalıntıları (Oksijen plazma uygulanarak minimize edilebilir)
- Bakteri (iyi bir De-iyonize (DI) su yıkaması ile minimize edilebilir)
- Diğer kaynaklardan gelen tabakalar ;
 - Çözücü kalıntısı
 - H₂O kalıntısı
 - Fotorezist ya da arındırıcı kalıntısı
 - Yağ
 - Silikon

Yağdan arındırma yöntemi :

- 2-5 dakika arası ultrasonik uyarılmasıyla Aseton'da bekletilir.
- 2-5 dakika arası ultrasonik uyarılmasıyla Metanol'de bekletilir.
- 2-5 dakika arası ultrasonik uyarılmasıyla DI suda bekletilir.
- 30 saniye boyunca akan DI su altında bekletilir.
- N₂ ile kurulanır.

Fotorezist kaplama

Fotorezist ışığa duyarlı bir akışkan (hidrokarbon) bileşendir. Bir alttaş üzerine serpilir ve tasarlanan bir desen altında Ultra Viyole (UV) ışığa maruz bırakılarak istenmeyen alanların banyo edilmesi sağlanır (Şekil 4.4). Fotolitografi bir tekli desen transferidir [6].



Şekil 4.4. Fotorezist kaplama [6]

- Alttaş, vakum altında tutulan bir döndürme tablasına (vakumlu tutucu) yerleştirilip döndürülerek homojen bir kalınlıkta fotorezist kaplanır.
- Genel olarak 15-30 saniye boyunca 3000-6000 rpm arası döndürülür.
- Fotorezist kalınlığı aşağıdaki parametrelere bağlıdır ;
 - Döndürme hızı (Round Per Minute - RPM)
 - Döndürme süresi
 - Akıtılan solüsyonun konsantrasyonu
 - Akıtılan solüsyonun miktarı
- Konsantrasyon ve solüsyonun hacmi arttıkça fotorezist kalınlığı artar, döndürme hızının ve süresinin artmasıyla da azalır. Ancak döndürme süresi konsantrasyona göre kalınlık üzerinde çok düşük bir etkiye sahiptir.

- Fotorezist kalınlıkları çoğunlukla 1-2 um arasındadır.

Fotorezist kalınlığı $t = kp^2/w^{1/2}$ formülü ile bulunur.

Burada, k : Döndürme (Spinner) Sabiti (Genelde 80-100 arasındadır), p : Rezist katılarının yüzde içeriği ve w : Döndürme Rotasyonel Hızı (rpm/1000) değerlerini ifade eder.

3 çeşit fotorezist vardır.

➤ Pozitif Rezist :

Malzemenin UV ışığa maruz kalan bölgelerindeki kimyasal bağlar kırılır. Maruz kalan alanlar banyo ile erirken, diğer bölgeler olduğu gibi kalır. Rezist üzerindeki desen maske ile aynı olur. Pozitif rezist daha kararlı ve maliyeti düşüktür, bu nedenle daha yaygındır.

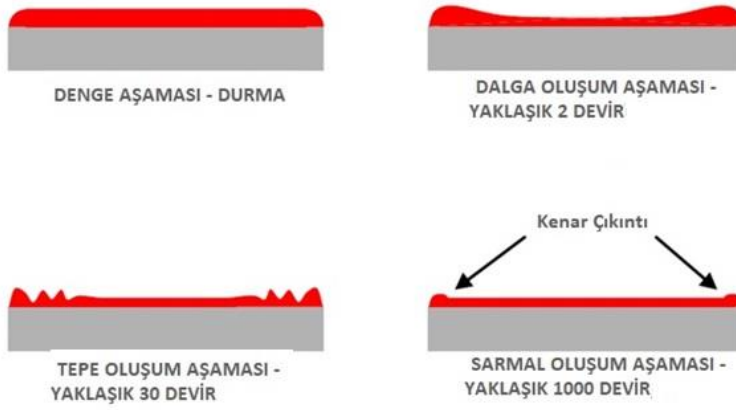
➤ Negatif Rezist :

Malzemenin UV ışığa maruz kalan bölgelerinde kimyasal bağlar daha da kuvvetlenir. Burada da maruz kalan alanlar güçlendiğinden banyo sonrası olduğu gibi kalırken, ışığa maruz kalmayan alanlar banyo ile eritilir.

➤ Çift Taraflı Rezist :

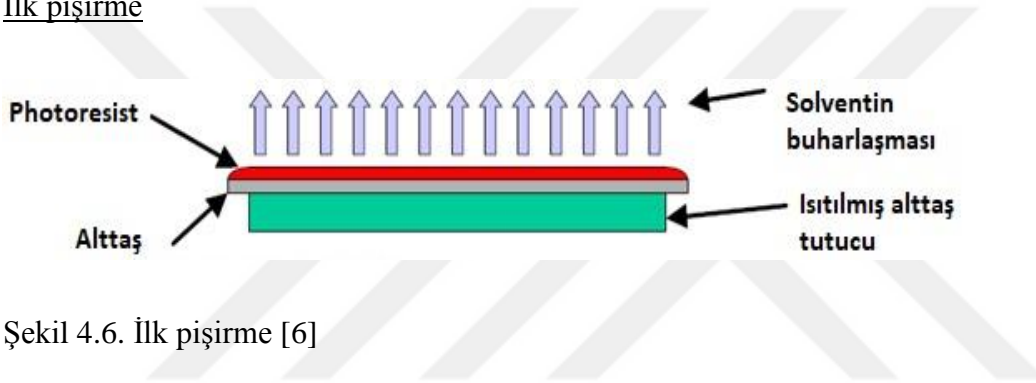
Pozitif ve Negatif desen transferi için kullanılabilir. Her iki amaç için kullanılabileceğinden avantajlıdır. Ancak uygulanması negatif ve pozitif rezistlere göre daha zor olduğundan özel işlemlerde uygulanmak için kullanılır.

Fotorezist kaplanırken 4 aşamadan geçer. Bu aşamalardan birincisi, Denge Aşaması'dır. Bu aşamada fotorezist alttaşa akıtılır ve denge durumunu bulması beklenir. İkinci aşama ise, Dalga Oluşum Aşaması'dır. Bu aşamada ise, alttaş döndürülmeye başlanır ve çok düşük devirde fotorezist merkezden dışarı doğru yönelme eğilimine girer. Üçüncü aşama, Tepe Oluşum Aşaması'dır. Bu aşamada da, alttaş döndükçe kenarlara yönelen rezist kalınlığında tepeliklerin oluşması başlar. Dördüncü ve son aşama ise, Sarmal Oluşum Aşamasıdır. Bu aşamada alttaş yüksek devirde döner ve en dış kısımda kenar çıkıntıları oluşur (Şekil 4.5). Bu kenar çıkıntısı işlem sonunda istenmediğinden, alınması için uygulama yapılan cihazda bu alandan arındıran işlemler mevcuttur [6].



Şekil 4.5. Rezist kaplama aşamaları [6]

İlk pişirme



Şekil 4.6. İlk pişirme [6]

- İlk pişirme işlemi fotorezist kaplama işleminden sonra kaplama çözücüsünün çözünmesi ve rezisti yoğunlaştırmak için yapılır (Şekil 4.6).
- Termal döngüsü ;
 - 20 dakika 90-100 C° de bir konveksiyon fırınında,
 - Veya 45 saniye boyunca 75-85 C° de bir sıcak tablada tutulur.
- Üretim hatlarında genel olarak mikrodalga ısıtıcı ya da IR lambalar kullanılır.
- Genelde rezist için sıcak tablanın kullanılması daha hızlı, daha kontrollüdür ve konveksiyon ısıtıcılar gibi çözücüü hapsetmez.

Konveksiyon fırınları :

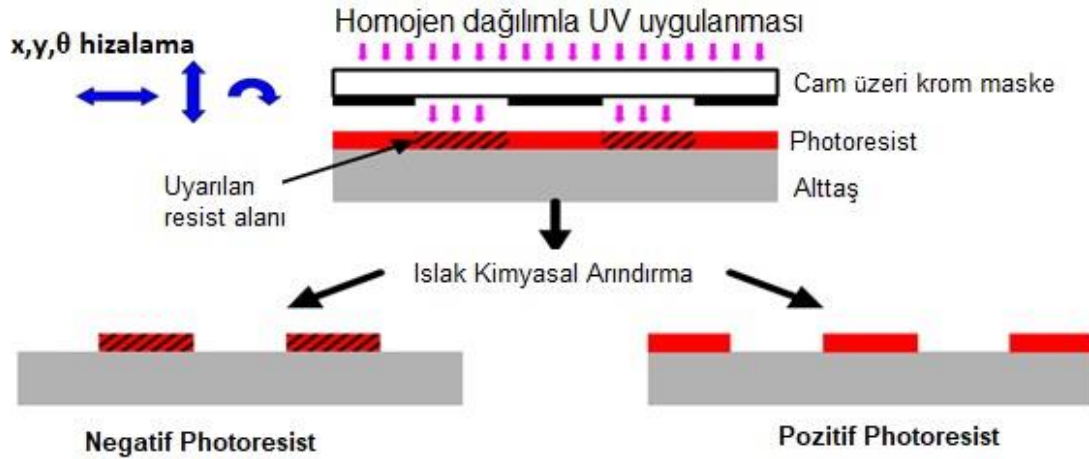
- İlk olarak, rezistin su geçirmeyen yüzeyinin kalkmasını sağlayan rezist yüzeyindeki çözücünün buharlaşması gerçekleşir, kalan çözücü de içeride hapsolür.
- Çözücünün parlama etkisinden kaçınmak için ısıtma işleminin yavaş olması gerekmektedir.

Isı tablası :

- Isının eşit olarak dağılabilmesi için pürüzsüz bir yüzeye sahip olması gerekir.
- Sıcaklığın artması alttaşın altından yukarıya doğrudur, baştan sona daha fazla çözücü buharlaşması gerçekleşir.
- Otomatik kontrol için daha hızlı ve elverişlidir.

Hizalama/Maruz kalma/ Banyo

Hizalama, maruz kalma ve banyo işlemleri bütün olarak Şekil 4.7'de gösterildiği gibidir. Şekilde de görülebildiği gibi homojen dağılıma sahip bir UV kaynağından gönderilen ışık hüzmesi maskeden geçerek alttaşa ulaşır. Kullanılan fotorezist ve maske deseninin uyumlu olması gerekmektedir. Pozitif veya negatif rezist kullanımlarına göre maske deseni tasarlanırken ayna görüntüsü alınması gerekebilir. Uyumlu olan rezist ve maske kullanımı ile, şekildeki gibi istenilen rezist tabakasına ışın gönderilir ve o bölge uyarılır. Uyarılan bölge pozitif rezist ise, o bölgedeki bağlar zayıflar ve banyo edilir (develop). Uyarılan bölge negatif ise, o bölgedeki bağlar daha da kuvvetlenir ve diğer alanlardaki rezist kaldırılır (remove).

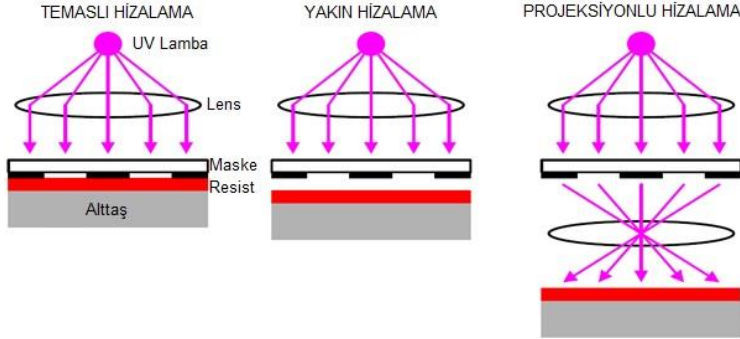


Şekil 4.7. Hizalama, maruz kalma ve banyo adımları [7]

3 tip Hizalama (Align) yöntemi mevcuttur (bkz. Şekil.4.8).

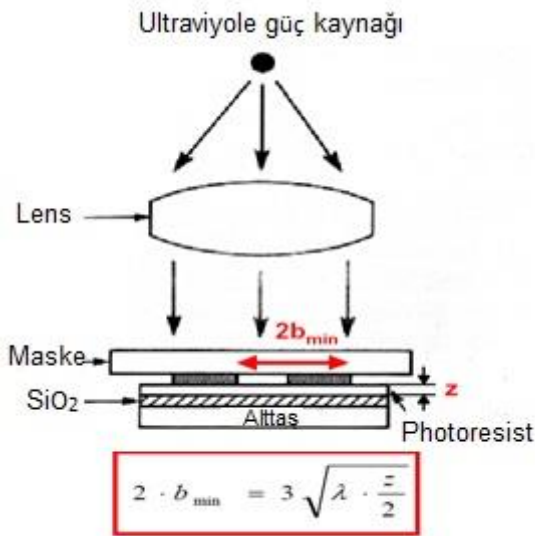
- Temaslı Hizalama (Contact Aligner) : Alttaşa temas ile hizalama yapılır.
- Yakın Hizalama (Proximity Aligner) : Maske üzerinde daha az yıpranma, ancak Contact Aligner'a göre daha zayıf görüntü elde edilir.

- Projeksiyonlu Hizalama (Projection Aligner) : Yeniden üretimde desen büyüklüğünün oranı değiştirilebilir. Ve maskenin zarar görmesine karşı daha kuvvetlidir.



Şekil 4.8. Hizalama yöntemleri [6]

Temaslı Hizalama (Contact Aligner) tipinde maske ile alttaş arada boşluk kalmayacak şekilde temas eder (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Temaslı hizalama yöntemi [7]

Burada λ , UV güç kaynağının alttaş maruz bıraktığı dalgaboyunu ifade eder.

Bu yöntemin avantajları,

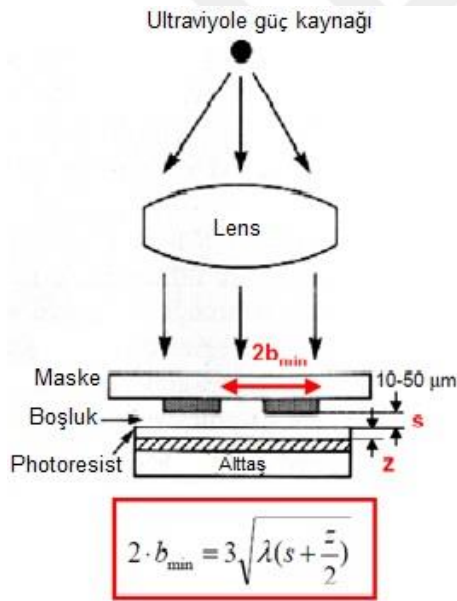
- Karışık olmaması,
- Ucuz olması,

- Hızlı olması,
- Ve saçılmasının en az seviyede olmasıdır.

Dezavantajları ise,

- Maske ile alttaş örtüştüğünden, maskenin zarar görme ihtimali,
- Maskenin boyutunun alttaş ile aynı olması gerektiğinden büyük olup yer kaplayacak olması ve pahalı olmasıdır.

Yakın Hizalama (Proximity Aligner) tipinde ise maske ile alttaş arasında az miktarda boşluk olacak şekilde hizalanır (Şekil 4.10) [6].



Şekil 4.10. Yakın hizalama yöntemi [7]

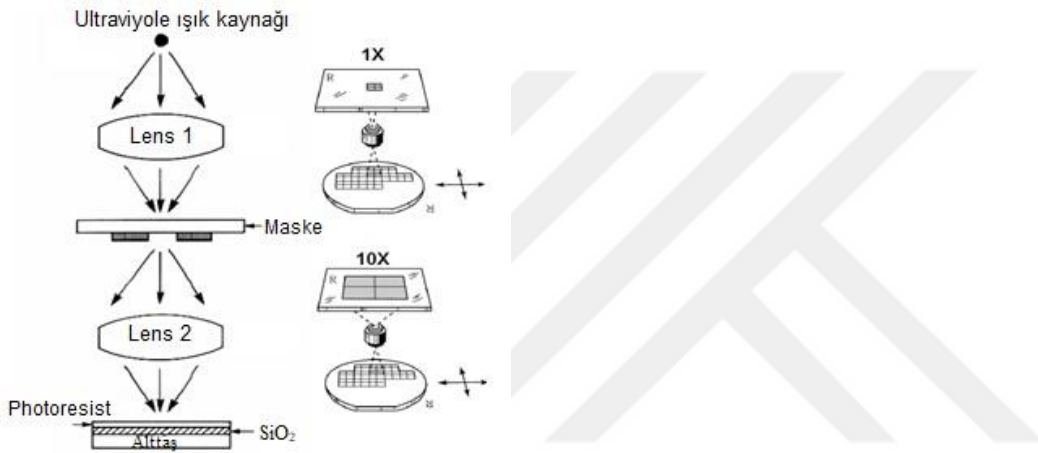
Bu yöntemin avantajları,

- Maskenin alttaşa temas etmemesinden dolayı zarar görmemesi,
- Ve hızlı olmasıdır.

Dezavantajları ise,

- Maske alttaştan ayrık olduğu için saçılmalardan kaynaklı çözünürlük oluşması,
- Maskenin boyutunun alttaş ile aynı olması gerektiğinden büyük olup yer kaplayacak olması ve pahalı olmasıdır.

Projeksiyon Hizalama (Projection Aligner) tipinde ise maske ile alttaş arasında bir lens konularak aradaki mesafenin arttırılması sağlanarak hizalama yapılır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Projeksiyon hizalama yöntemi

Bu yöntemin avantajları,

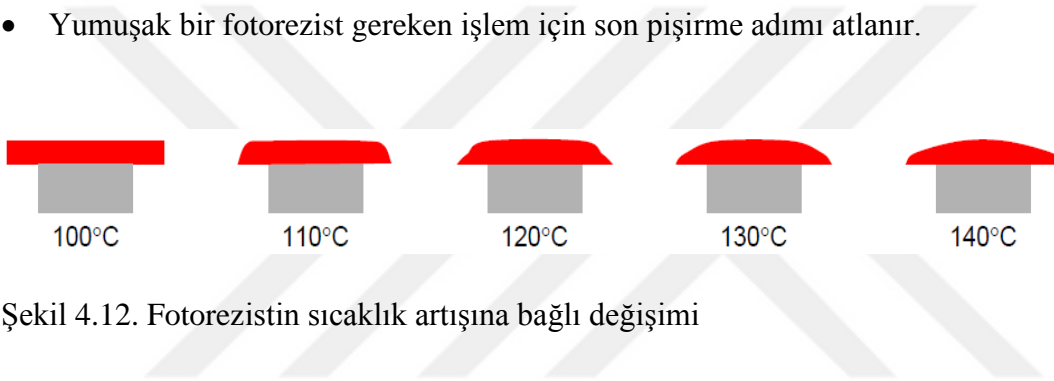
- Maskenin alttaşa temas etmemesinden dolayı zarar görmemesi,
- Büyüklükten bağımsız olması : 1X'ten 10X'e kadar farklı boyutlarda maske ile çalışılabilir olmasıdır.

Dezavantajları ise,

- Yavaş olması,
- Step motor ihtiyacının olması, pahalı ve çok işlem gerektirmesidir.

Son pişirme

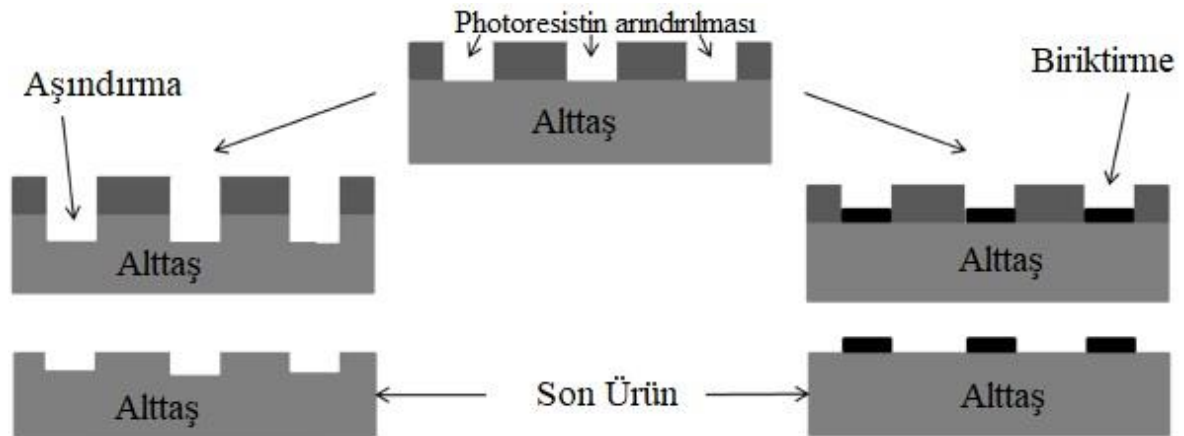
- Banyo sonrası fotorezistin stabil olması ve sertleşmesi için gerçekleştirilir.
- Temel parametre plastik akış ya da camlaşma sıcaklığıdır.
- Son pişirme adımında kaplama çözücüsü ya da banyo işleminden kalıntılar temizlenir.
- Vakum işleminde çözücünün parlama etkisi bu adım ile elenir.
- Son pişirme fotoreziste doğru baskı uygular.
- Fotorezistte biraz büzüşme (shrinkage) meydana gelebilir (bkz. Şekil.4.12).
- Uzun süreli veya daha sıcak son pişirme işlemi fotorezistin ayrılmasını güçleştirebilir.
- Asit aşındırma için sert son pişirme gereklidir.
- Yumuşak bir fotorezist gereken işlem için son pişirme adımı atlanır.



Şekil 4.12. Fotorezistin sıcaklık artışına bağlı değişimi

Fotorezistin maske olarak kullanılması

Bu aşamada, maske olarak kullanılabilen fotorezist ile kaplı alttaşın aşındırılması ya da biriktirilmesi işlemi gerçekleştirilerek desenin transfer edilmesi sağlanır (bkz. Şekil.4.13).

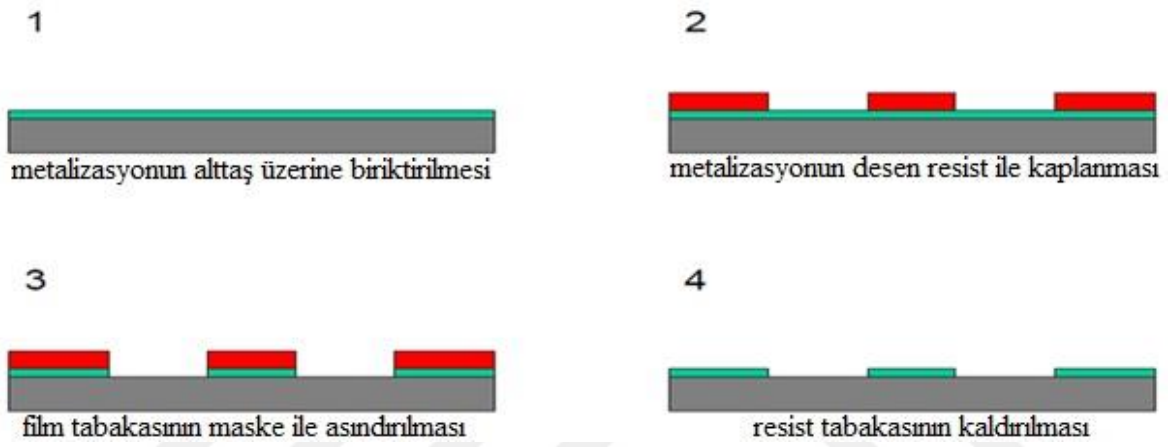


Şekil 4.13. Aşındırma ve biriktirme işlemleri

Bir alttaş üzerinde desen elde etmede temel iki metot kullanılır. Bunlar Etch-Back ve Lift-Off olarak adlandırılırlar.

Etch-Back

Bu yöntemde alttaş üzerine önce metalizasyon biriktirilerek işlemlere başlanır. Biriktirilen metalizasyon üzerinde fotolitografi uygulanır (Şekil 4.14). Bu yöntem daha kolay ve uygulanabilir olduğundan çok daha fazla tercih edilmektedir.

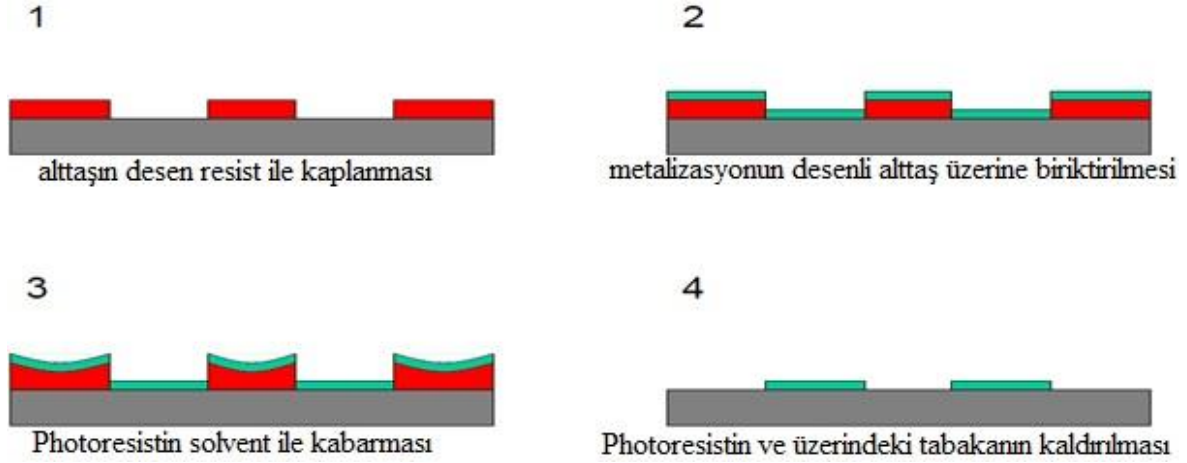


Şekil 4.14. Etch-Back İşlem Adımları

- Fotorezist, desen ile aynı polariteye sahip olduğundan alttaş yüzeyine temas etmez.

Lift-Off

Bu yöntemde ise alttaş üzerine önce istenilen deseni yaratmak için resist tabakası kaplanır ve fotolitografi işlemi uygulanır. Ardından biriktirme yöntemi ile desenin kaplanması istenen boş alanları metalizasyon ile kaplanılarak istenmeyen bölgeler resist ile birlikte kaldırılır (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Lift-Off İşlem Adımları

- Fotoresist, desen ile zıt polariteye sahip olduğundan, fazlalık olan kaplama alttaş yüzeyine temas etmez.
- Film kalınlığı rezistin kalınlığından daha küçük olmalıdır.
- Rezist üzerinde kalan kaplama rezist ile beraber ayrılır.
- Uygulaması Etch-Back'e göre daha zordur.

Soyma

Etch-Back ve Lift-Off adımlarında 3 numaradan 4 numaralı şekillere geçerken fotoresistin yüzeyden soyulması gerçekleşir.

- Genelde basit çözücüler son ısıtmasız Fotoresistler için yeterlidir.
 - Pozitif Fotoresistler için : Aceton, Trichloroethylene (TCE), Phenol-baset strippers
 - Negatif Fotoresistler için : Methyl Ethyl Ketone (MEK) ($\text{CH}_3\text{COC}_2\text{H}_5$), Methyl Isobutyl Ketone (MIBK), $\text{CH}_3\text{COC}_4\text{H}_9$

Külleme

Soyma sonrası Oksijen ile Plazma Aşındırma yöntemidir. Organik polimer döküntülerin yüzeyden kaldırılmasında etkilidir [6].

4.3. Tasarılan Mikroşerit Filtrenin Üretimi ve Testi

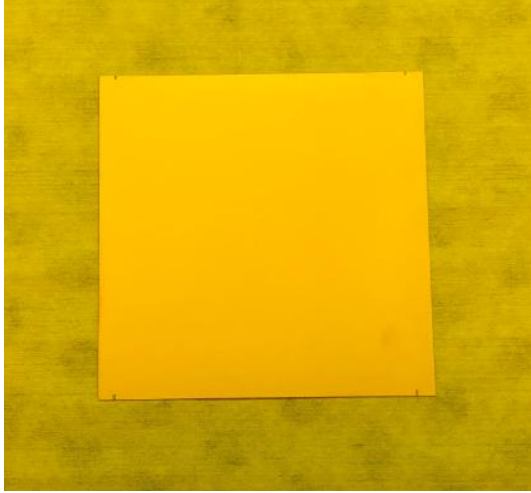
Tasarımı yapılan mikroşerit filtrenin üretimi bölüm 4.2’de anlatılan yöntemlerden farklı olarak manüel olarak yapılmıştır. Manüel yöntem ile otomatik cihazlarla yapılan üretimler arasında elektriksel performans olarak bir fark yoktur. Yalnızca manuel yöntemde üretim hızı çok daha fazla olmakta ve daha yavaş işlem adımlarını içermektedir. Bu tez çalışmasında tasarlanan filtrenin üretimi manüel yöntem ile yapılmıştır.

Bölüm 4.2’de genel olarak İnce Film Üretim teknolojilerinden bahsedilmiştir. Anlatılanların dışında tasarım ihtiyaçlarına göre veya üretim maliyetlerine göre farklı yöntemler kullanılabilir.

Tasarımı gerçekleştirilen filtre FR4 malzemesinde kazıma yöntemi kullanılarak da üretilebilir. Bu tarzda çok sayıda üretim yapılan tez çalışması mevcuttur. Ancak bu yöntemde üretilen filtrelerin frekans cevabında, İnce Film Teknoloji ile üretilen filtrelere göre daha fazla kayıp görülmektedir.

İnce Film Üretimi için ortam gerekleri, en az Class6 olarak tanımlanan bir temiz odanın olması, temiz odanın içerisinde tüm ışık kaynaklarının sarı filtre ile kaplanmış olması ve gerekli tüm iş sağlığı ve güvenliği gereklerinin karşılanmış olmasıdır. Üretim yapılmadan önce tüm bu durumların uygunluğu kontrol edilmiştir.

Resim 4.1’de görülen altaş, üzeri altın ile önceden kaplanmış hazır olarak satın alınabilen bir malzemedir. Normal süreçte alümina üzeri metalizasyon kaplı olmadan satın alınır ve önce altın biriktirme yapılır ve işleme devam edilir. Ancak bu yapıda alümina üzeri 600 nm titanyum kaplı, onun üzeri de 5 um altın kaplıdır. Altaşın çift tarafı aynı kaplamaya sahiptir. Hazır altaş olarak adlandırılan bu yapı üzerinde fotolitografi manüel olarak uygulanmış ve istenilen tasarım çıktısı elde edilmiştir.

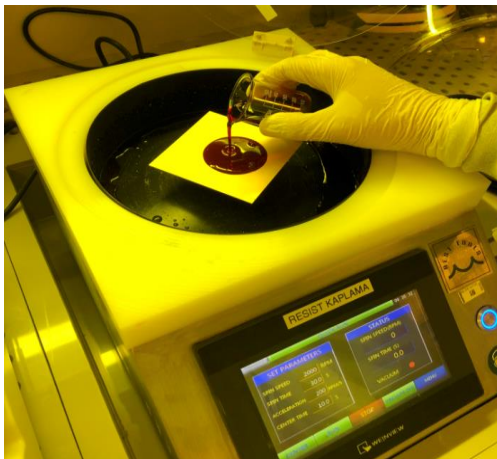


Resim 4.1. Altın kaplı alttaş (wafer)

Bu yöntemle üretime başlamak için ilk adım olan alttaşın fotorezist ile kaplanması Resim 4.2'deki gibi yapılmıştır. İşlem manuel olarak adlandırılrsa da aslında alttaşın rezist kaplanması ve döndürülmesi işlemi bir santrifüj cihazı ile yapılmak zorundadır. Kaplanan rezist malzemesinin homojen olması üretimin sağlıklı yapılabilmesi bakımından önemlidir. Bu işlemde pozitif rezist kullanılmıştır. Desenin doğru elde edilmesi için desen transferinde, desenin negatifi alınmıştır.

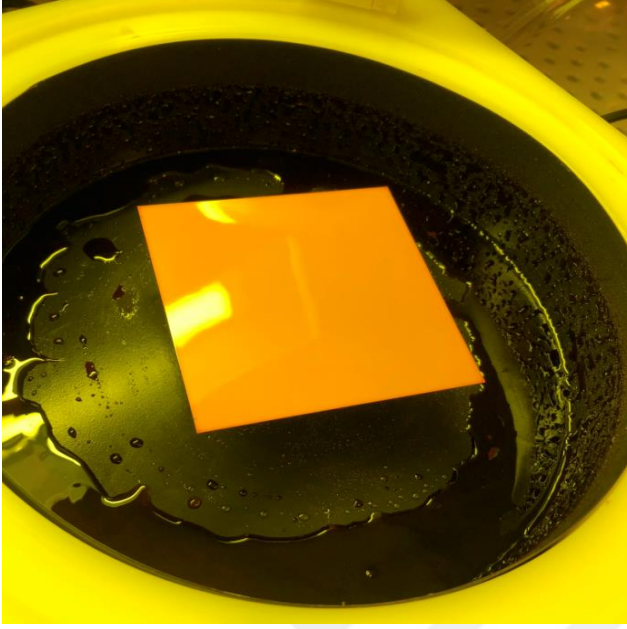
Döndürme parametreleri şu şekilde girilmiştir;

- 2000 rpm - döndürme hızı
- 200 rpm/s - ivmelenme hızı
- 30 sn - toplam işlem süresi



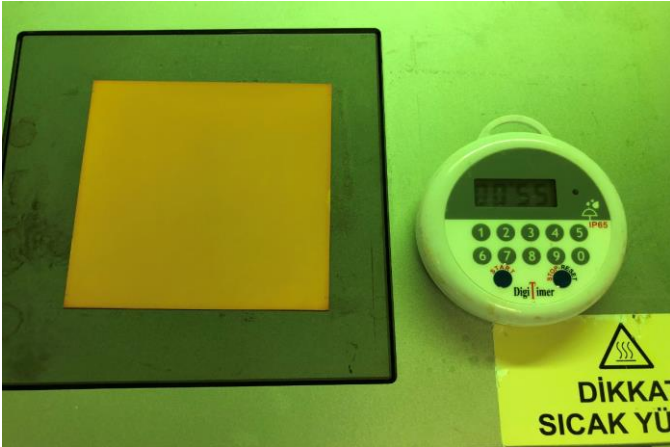
Resim 4.2. Alttaşın fotorezist ile kaplanması

Homojen olarak rezist kaplanmış alttaşın görüntüsü Resim 4.3'deki gibidir. Aynı işlem arka yüze de uygulanmıştır.



Resim 4.3. Fotorezist kaplanmış alttaş görüntüsü

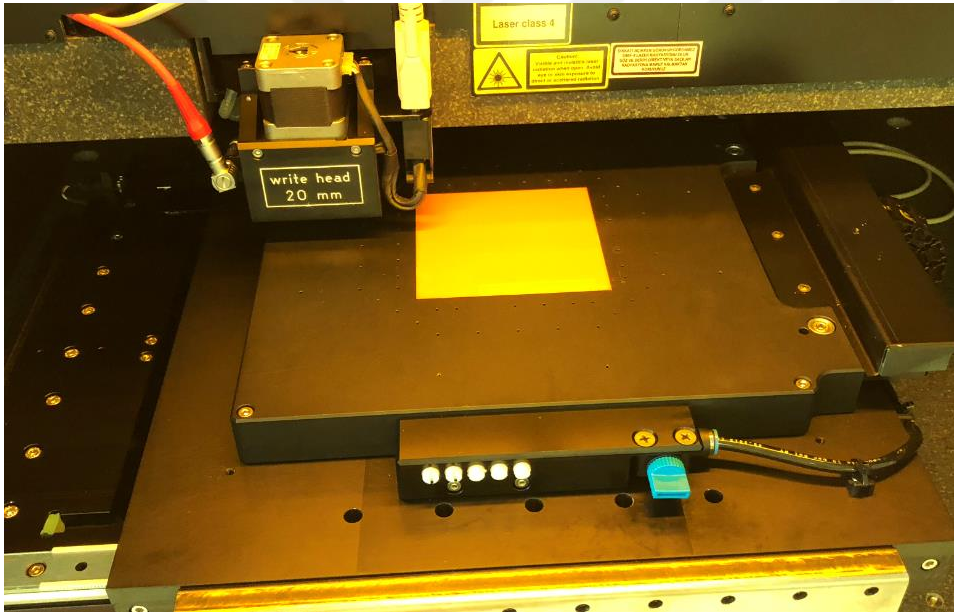
Resim 4.4'de görüldüğü gibi her iki yüz kaplanırken her bir yüzün kaplanmasının ardından ön ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. Her yüz 1 dk – 60 C° ön ısıtmadan geçirilmiştir.



Resim 4.4. Ön ısıtma işlemi

Fotorezist ile kaplanan alttaş normal üretim adımlarında ilgili tasarımları içeren maske kullanılarak UV ışına maruz bırakılmış ve saniyeler içerisinde rezist kaplı alttaş üzerinde

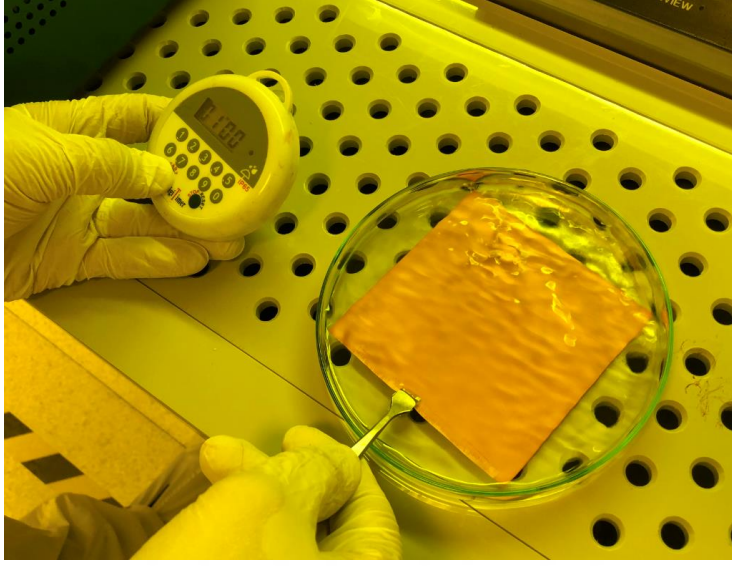
desenler oluşturulmuştur. Bu yöntemde maske yapımında da kullanılan Direct Writing (Doğrudan yazma) teknolojisi ile alttaş üzerine desen UV yazma kafası kullanılmıştır. Bu işlem maske ile UV uygulama işlemine göre daha uzun sürmektedir. Maske kullanıldığında bu işlem 5-10 saniyede gerçekleşirken burada tarama yapıldığından 40 dakika sürmüştür. Maske kullanımında hizalama ve maske ile alttaşın mesafesi çok önemlidir. Uygun olmadığı takdirde ışın sızacağından istenmeyen bölge de UV ile uyarılmış olabilir. Ancak Direct Writing ile yapıldığında, noktasal olarak tarama yapıldığından böyle bir risk yoktur. Filtre tasarımında 1.2 mil hat olduğu düşünüldüğünde Direct Writing ile tekrarlamaya gerek kalmadan bir defada litografi yapılabilir. Yanlış uygulama riski çok daha azdır. Ancak işlem süresi uzun olduğundan seri üretime uygun değildir. Normal şartlarda sadece maske yapımında kullanılır.



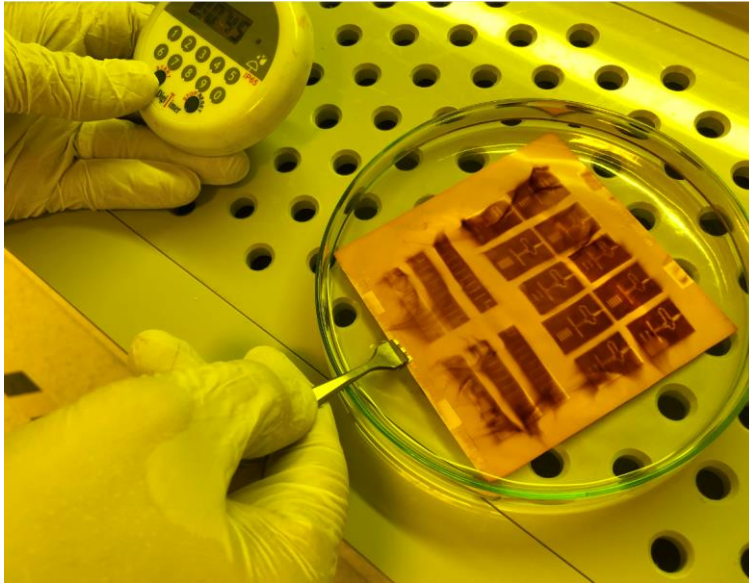
Resim 4.5. Doğrudan yazma yöntemi ile desen baskı

Resim 4.5’de görüldüğü gibi, rezist kaplı alttaş üzerine tasarım deseni yazılmıştır. Bu işlemlerde kullanılan malzeme ve cihaz kullanım maliyetleri göz önüne alındığında 10 cm²’lik bir alttaşın boş kalacak alanları israf olacaktır. Bu boyutlarda bir alttaşta tasarım malzemesinin boyutu hesaplanarak sığabilen aygıt sayısı hesaplanır ve cihaza yüklenen tasarım dosyası güncellenir. Maliyet hesaplarından dolayı, 6 adet filtre tasarımımız ve bir başka çalışma arkadaşımın tasarımı ile alttaş alanı dolduruldu.

Bir sonraki işlem adımı olan UV'ye maruz kalan bölgenin rezistten arındırılması işlemi için developer (banyo etme kimyasalı) ile Resim 4.6 ve Resim 4.7'deki gibi uygulama yapılmıştır. Banyo işlemi için uygulanan süre 1 dakikadır. Resim 4.6'da henüz daldırılan alttaşın UV uygulanan bölgeden arındırılmasının başlaması Resim 4.7'deki gibi 15 saniye sonrasında gerçekleşmiştir. 1 dakikanın sonunda istenilen bölgeler tamamen rezistten arındırılmıştır.

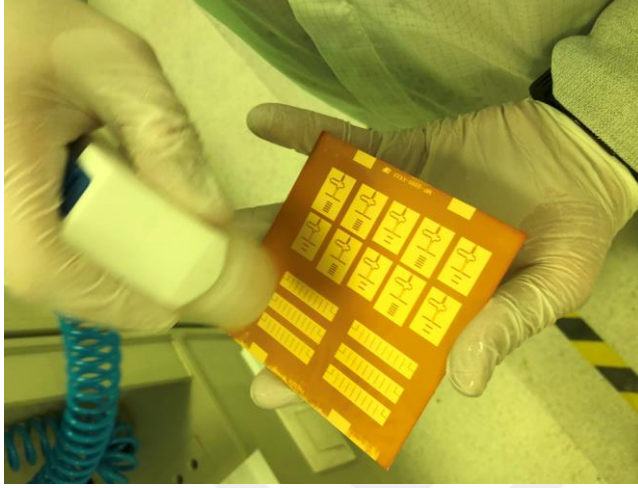


Resim 4.6. Rezistin arındırılması için kimyasala daldırılması



Resim 4.7. Rezist tabakasının arınmaya başlaması

Her kimyasal işlemten sonra alttaşın De-iyonize su ile yıkanması ve düzgün bir şekilde (filtrelenmiş temiz hava kaynağı ile) kurulması gerekir. Kurulama işlemi Resim 4.8’de gösterilmiştir.



Resim 4.8. Kurulma işlemi

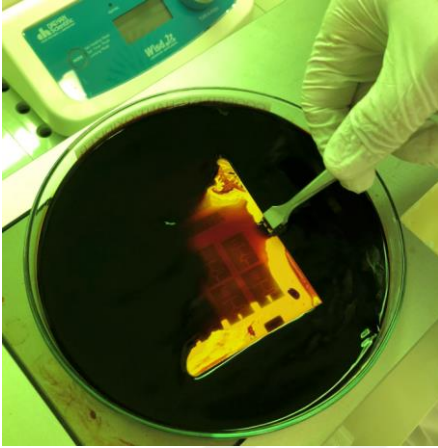
Kurulama işleminin ardından Resim 4.9’daki gibi son ısıtma işlemi 1 dakika ve 60 C° olarak uygulanmıştır.



Resim 4.9. Son ısıtma işlemi

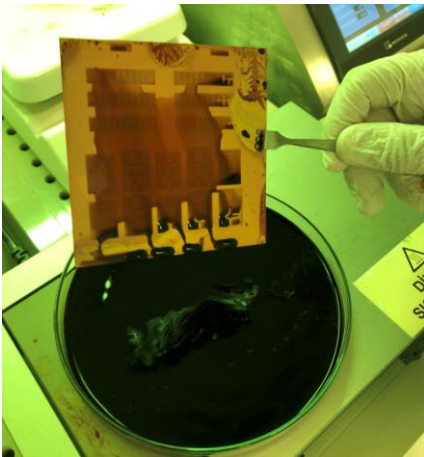
Alttaşın bu aşamasında desen üzerinde koruyucu rezist tabakası bulunmaktadır. Yani, filtrenin olduğu bölgede koyu renkli alanlar son katman olan altın üzerine rezist kaplı olan alanlardır. Açık renkli alanlar ise alttaşın orijinal halidir. Bundan sonraki işlemlerde açıkta kalan bölgelerin aşındırılması yapılmıştır.

Alumina üzerine 2 katman olduğundan ve en üst katman altın olduğundan ilk işlem açıkta kalan bölgedeki altının arındırılmasıdır. Bu nedenle Resim 4.10'da görüldüğü gibi alttaş Gold Etchant (altın aşındırıcı kimyasal) 'a daldırılarak 5 dakika bekletilmiştir. İşlem sıcak tabla üzerinde uygulanmıştır. Bunun nedeni de aşındırıcı kimyasalın yüksek ısıda daha hızlı tepki vermesidir. İşlem esnasında aşınan altının yüzeyden atılması ve kimyasalın aşınan bölgenin altına nüfuz etmesi için arada bir alttaş tutucu ile alttaşın kimyasal sıvı içerisinde sallanması sağlanmıştır.



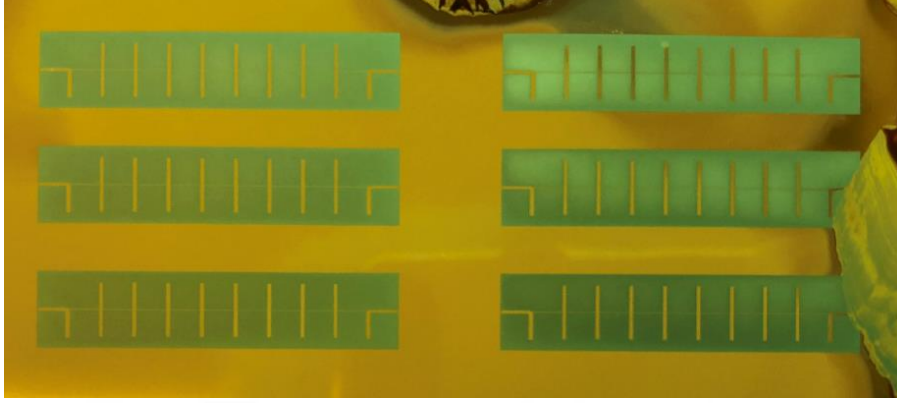
Resim 4.10. Alttaşın altın aşındırıcıya maruz bırakılması

Süre bitiminde Resim. 4.11'deki gibi alttaş kimyasal sıvıdan çıkarılmış ve tüm kimyasalın akması için bir süre kap üzerinde bekletilmiştir. Ardından önceki işlem adımlarında yapıldığı gibi bir an önce kimyasaldan arındırılması için de-iyonize su altında yıkanmış ve kurutulmuştur.



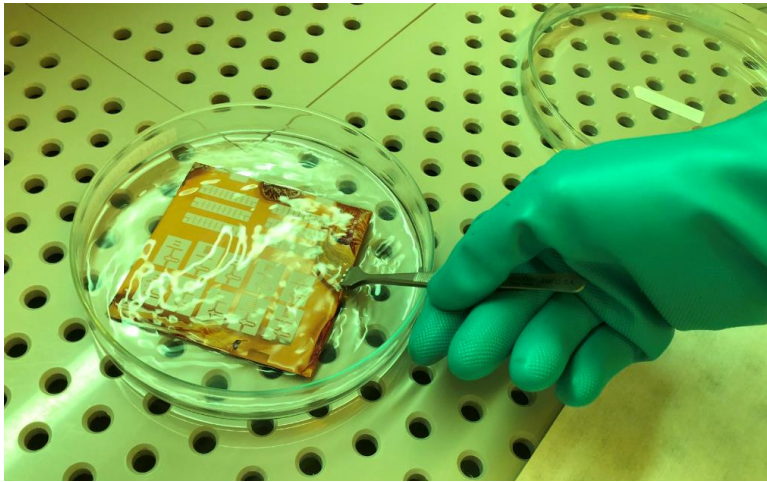
Resim 4.11. Alttaşın altın aşındırıcıdan çıkarılması

Desen dışında istenmeyen alandaki altın aşındırılarak kaldırılmıştır. Bir alt tabakada olan titanyumun ortaya çıkması Resim 4.12’de görülebilir.



Resim 4.12. Desen dışında kalan titanyum metalizasyonunun görüntüsü

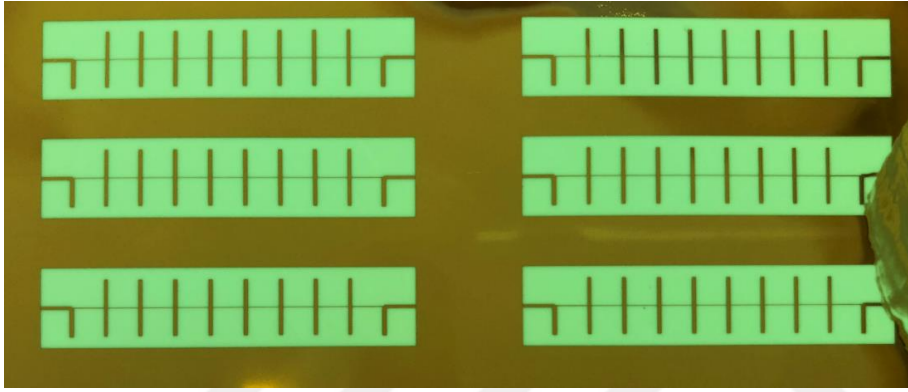
Altaşı titanyum tabakasından da arındırmak için Resim 4.13’de görüldüğü gibi Titanium Etchant (Titanyum aşındırıcı kimyasal) kullanılmıştır. Bu kimyasal diğer kimyasallara göre daha tehlikeli olduğundan lateks eldiven yerine kimyasala daha dayanıklı bir eldiven kullanılmıştır. Önceki işlemlerde ve bu işlemde ayrıca fotoğraflarda görünmeyen, ağız maskesi, baş bölgesi koruma kalkanı, önlük vb. koruyucu giysiler kullanılmıştır. Bu nedenle bu konularda eğitim almamış kişilerin bu uygulamaları tek başına yapması kesinlikle tavsiye edilmemektedir.



Resim 4.13. Altaşın titanyum tabakasından arındırılması

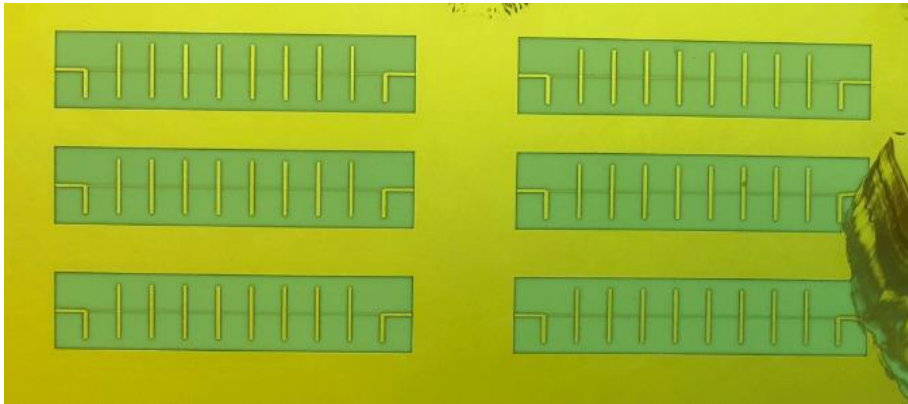
Alttaşın titanyum tabakasından da arındırılmasının ardından, alttaş incelendiğinde Resim 4.14'deki gibi desen net bir şekilde görünecek olup, desen üzerinde ve desen için ayrılmış bölgenin dış kısmında koruyucu görevini gören rezist kaplı olduğu gözlenecektir.

Manüel üretimde üretim firesinin olabileceği düşünülerek alttaşa 6 adet aygıt yerleştirilmişti. Nitekim, bu aşamada Resim 4.14'ün sağ altında kalan 2 adet aygıtın hasar gördüğü ve kullanılamaz hale geldiği görülmektedir. İşlemlere geriye kalan 4 adet filtre için devam edilmiştir.



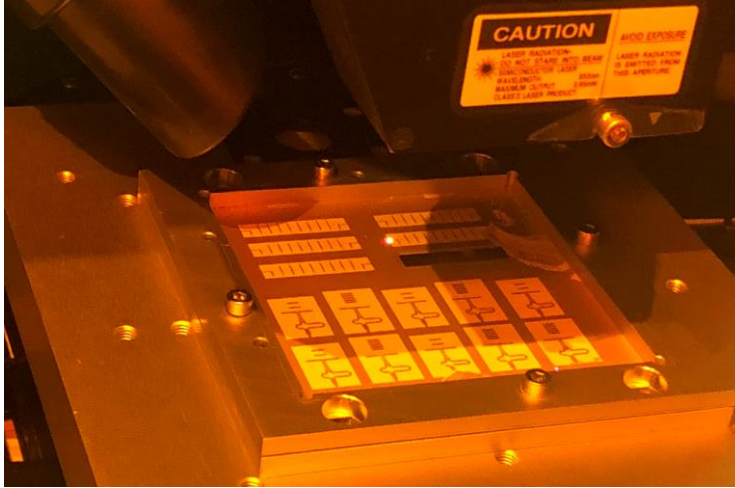
Resim 4.14. Sadece rezist koruma tabakasının olduğu desen görüntüsü

Tasarım desenini tam olarak ortaya çıkarabilmek için son adım olan rezistten arındırma işlemi için remover (rezistin kaldırılmasında kullanılan kimyasal) kullanılmıştır. Resim 4.15'de görülen alttaş üzerinde tasarım aygıtının son hali görülebilir.

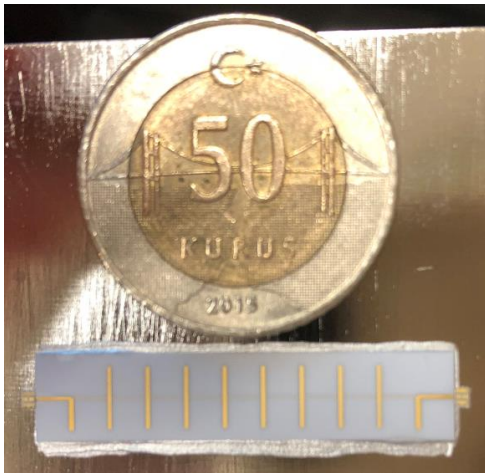


Resim 4.15. Desen oluşturulmuş alttaş görüntüsü

Elde edilen aygıtların kullanılabilmesi için alttaştan ayrılması gerekmektedir. Bu işlem aslında kolay değildir. Alumina 10 mil kalınlığında olduğundan çatlamaya ve kırılmaya karşı hassastır. Bu nedenle kesilmesi için özel yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan en kullanışlı olanı “Wet Dicing” ismi verilen yöntemdir. Bu işlem de seri üretimde kullanıldığından manuel yöntemde delik (via) açmak için kullanılan lazer kesim cihazı kullanılmıştır. Bu işleme özel parametrenin geliştirilmesi için Resim 4.16’da görülen bir önceki adımda fire olan aygıtlardan başlanmış ve her iki aygıt kesildikten sonra belirlenen parametre ile sağlam olan diğer 4 aygıtın kesilmesi işlemi yapılmıştır. Ancak sağlam olan 4 aygıttan ilkinin stresten kaynaklı olarak çatladığı tespit edilmiştir. Kalan 3 aygıt düzgün çıkarılarak 6 adet aygıttan 3 adeti istenilen doğrulukta elde edilmiştir. Test sonuçlarının karşılaştırılması için 3 adetin yeterli olduğu düşünüldüğünden üretimin tamamlanmasına karar verilmiştir.



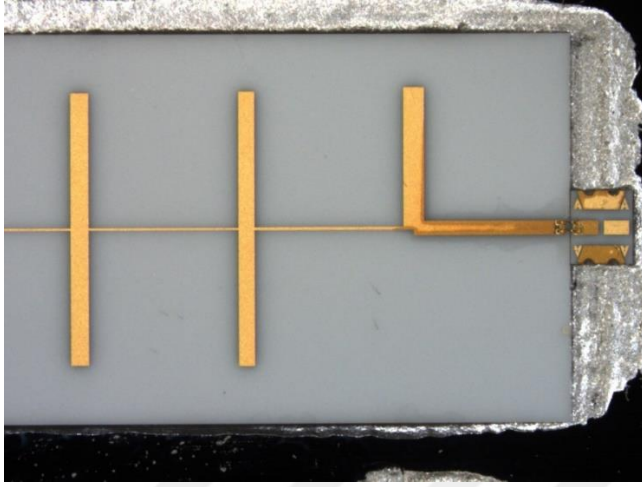
Resim 4.16. Aygıtların lazer kesim cihazı ile alttaştan çıkarılması



Resim 4.17. Aygıtın 50 kuruş ile boyutsal karşılaştırılması

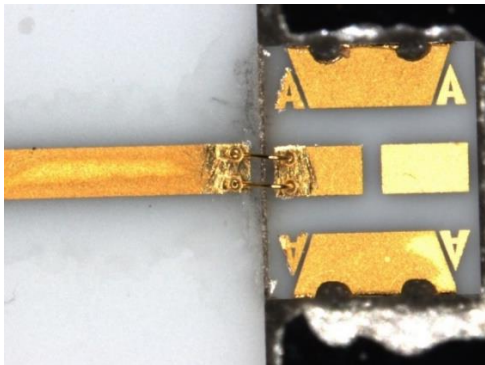
Resim 4.17’de görülen üretilen aygıtın uzunluğu 3 cm civarındadır.

Resim 4.18’de görülen filtre mikrodalga üretim altyapısı kullanılarak bir kupon üzerine dizilmiştir. Bu tez konusu mikrodalga üretim yöntemlerini içermediğinden, üretim detaylarına yer verilmemiştir. Kupon üzerine gümüş iletken epoksi yardımı ile dizgisi yapılan filtrenin her iki ucunda test edilebilmesi amacıyla Resim 4.18’de görüldüğü gibi test noktası adı verilen aygıtlar yerleştirilmiştir.



Resim 4.18. Aygıtın test noktası ile birlikte görünümü

Her iki uca yerleştirilen test noktaları ile filtrenin arasında elektriksel iletimin yapılabilmesi için Mikrodalga Üretim bünyesinde yapılan altın tel bağlama işlemi yapılmıştır. Her bir filtre için birbirine karşılık gelen iki hat arasında 2’şer adet 1 mil kalınlığında altın tel bağlantısı yapılarak Resim 4.19’daki gibi iletim sağlanmıştır. Böylelikle sonraki adım olan test işlemine hazır hale getirilmiştir.



Resim 4.19. Aygıt ve test noktası arasına atılan 2 adet 1 mil telin görüntüsü

Resim 4.20’de görüldüğü gibi 3 adet filtre 2 adet kupona dizilmiştir. Filtrelerin sonuçlarının değerlendirilmesi için numaralandırılarak test ortamına alınmıştır.



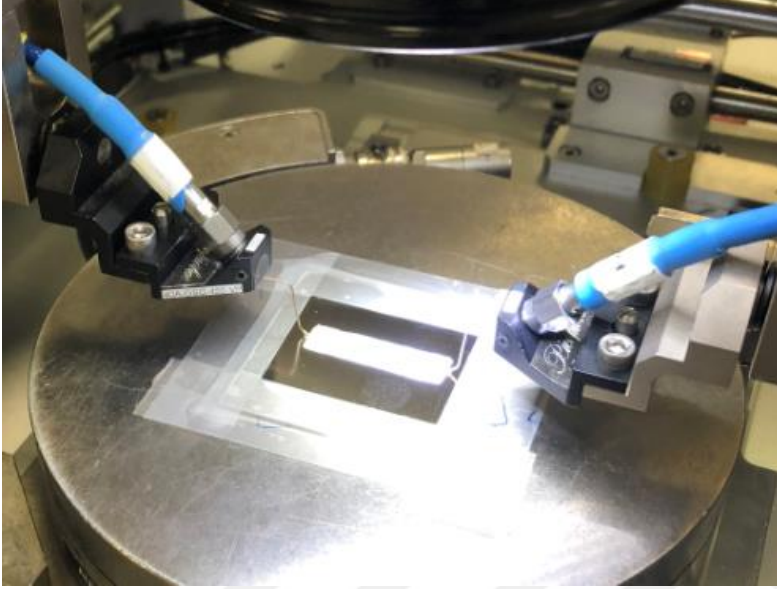
Resim 4.20. 3 adet aygıtın test için 2 kupona dizilmiş görüntüsü

Üretilen filtrelerin test edilecek frekans aralığına göre kalibrasyonlarının yapılması gerekmektedir. Resim 4.21’deki test düzeneği kurulduktan sonra Vector Signal Generator cihazında 1-20 GHz aralığına uygun kalibrasyon kitleri ile kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.21. Test düzeneğinin kurulması

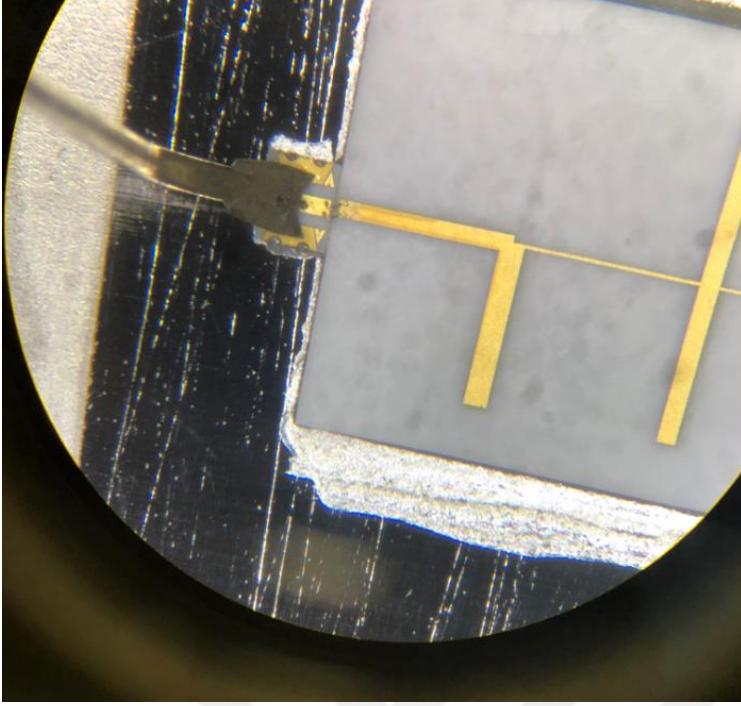
Uygulanan kalibrasyon işleminden sonra cihaz uygunluğu alınmış ve Resim 4.22'deki düzenek kurularak filtreler probe altına hizalı şekilde yerleştirilmiştir. Filtre sonucunu doğrudan etkileyeceğinden probe uçlarının test noktasına tam olarak temas etmesine dikkat edilmiştir.



Resim 4.22. Aygıtın test düzeneğine yerleştirilmesi

Probe ucunun test noktasına tam anlamıyla temas edip etmediğinin kontrolü test düzeneğinde bulunan mikroskop ile Resim 4.23'deki gibi kontrol edilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı üzere, mikroskobun görüş alanı bir filtrenin iki ucunu birden görüntüleyemiyor. Bir nokta ayarı yapıldıktan sonra diğer noktaya tekrar bakılması gerekiyor. Aygıt testinden sonra temastan kaynaklı olduğu düşünülen grafik hatası veya istenmeyen sonuç elde edildiğinde bu ayarın bir daha tekrarlanması faydalı olacaktır.

Bir diğer önemli husus ise, filtrenin her iki ucunda bulunan tel bağlantılarının probe ucu ile hasar görmemesidir. Bazı durumlarda probe ucu tel bağlantısını koparmakta veya hasar verip zayıflatabilmektedir. Bu durum test düzeneğindeki mikroskop ile görüntülenememektedir. Bu nedenle tel ile temas etmediğine emin olunmalıdır. Bu tür durumlara dikkat edilerek test işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilerek S2P formatında alınan test sonuçları, benzetim ile karşılaştırılmak üzere AWR programına aktarılmıştır.

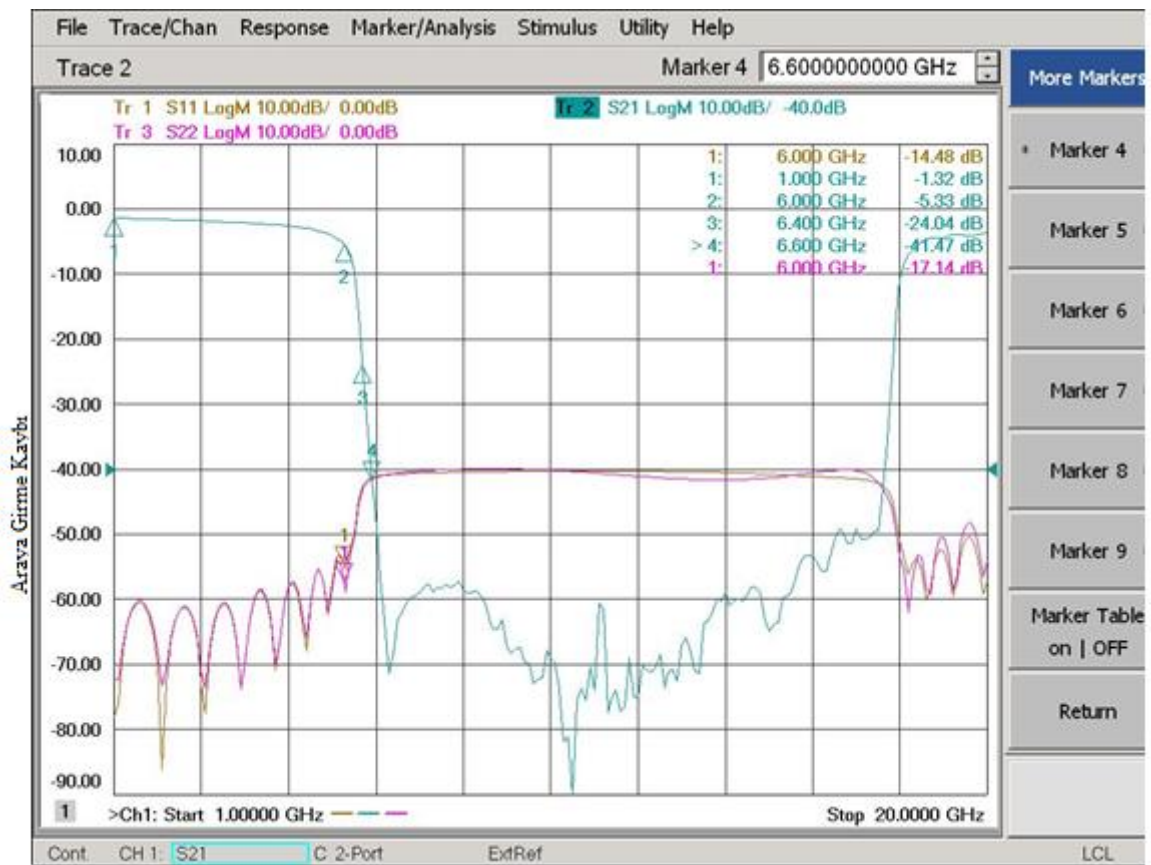


Resim 4.23. Probe ucunun test noktasına inmiş halinin mikroskop görüntüsü



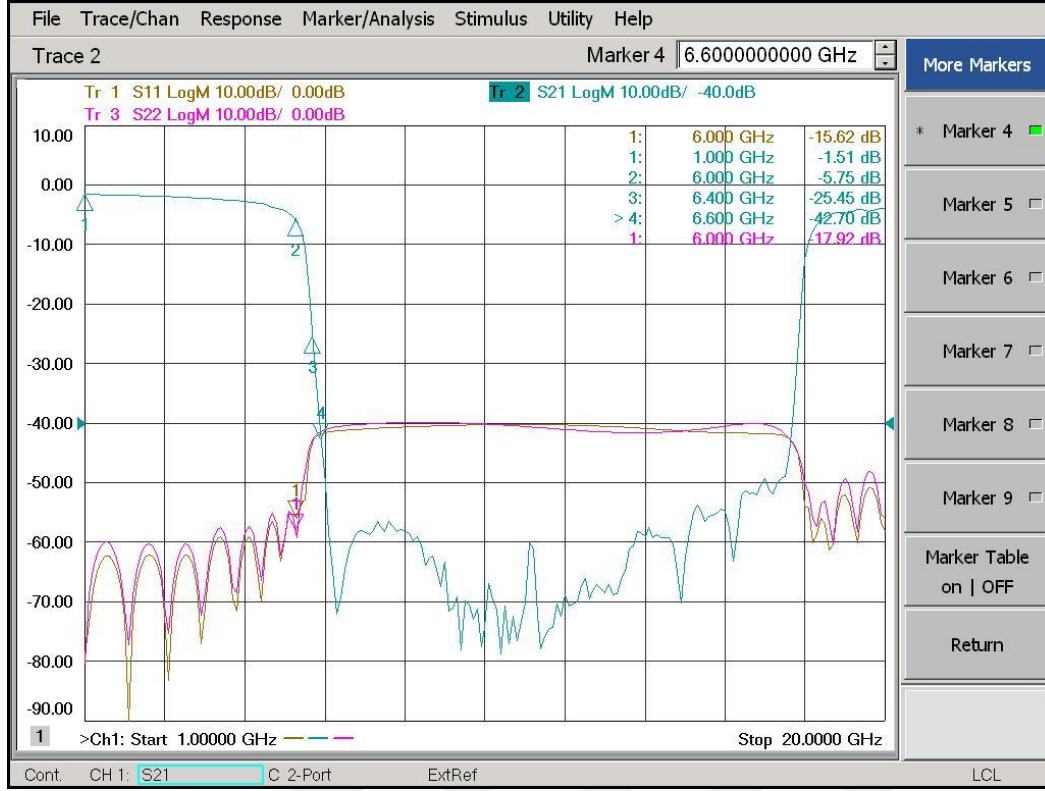
5. FİLTRE TASARIM VE ÜRETİM SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Önceki bölümde üretimi gerçekleştirilen filtreler numaralandırılarak test edilmiştir. 1 numaralı filtrenin Vector Signal Generator'dan alınan sonuç grafiği Şekil 5.1'de gösterilmiştir. S_{11} Yansıma Kaybı ve S_{22} Araya Girme Kaybı değerleri birlikte gösterilmiştir. Önemli olan frekans değerlerine işaretleyici konularak ilk anda grafik üzerinde okunması sağlanmıştır.

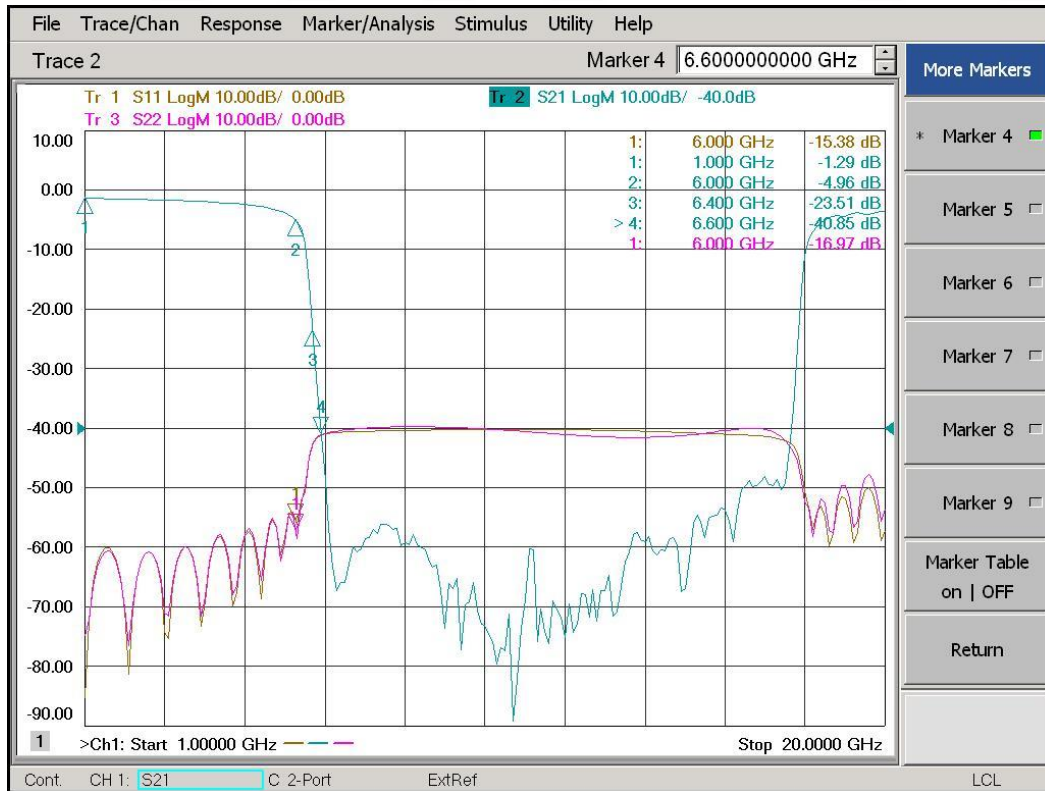


Şekil 5.1. 1 numaralı filtrenin test sonuç grafiği

Şekil 5.2'de 2 numaralı filtrenin sonucu, Şekil 5.3'de de 3 numaralı filtrenin sonucu gösterilmiştir. Üretilen filtrelerin kendi içlerinde ve benzetim sonucu ile örtüşüp örtüşmediği, istenilen değerleri sağlayıp sağlamadığı gibi durumların gözlemlenebilmesi için tüm sonuçların üst üste gelecek şekilde gösterilmesi gerekmektedir. Vector Signal Generator çıktısı AWR üzerinde SP2 formatı ile analiz edilebilmektedir.

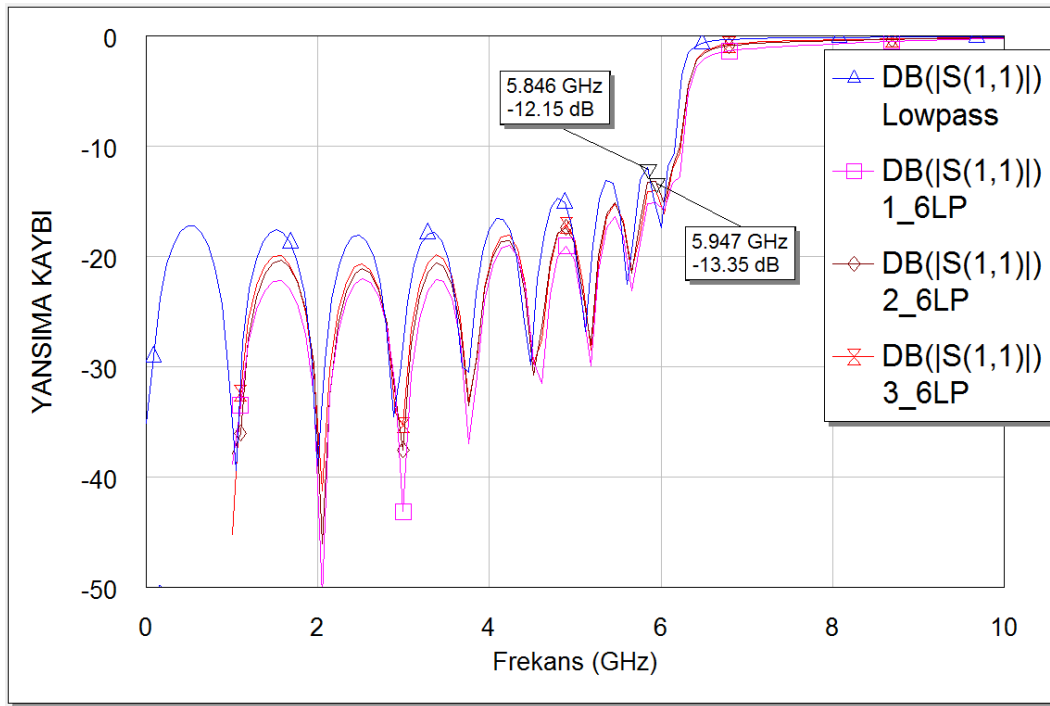


Şekil 5.2. 2 numaralı filtrenin test sonuç grafiği



Şekil 5.3. 3 numaralı filtrenin test sonuç grafiği

Vector Signal Generator ile testleri gerçekleştirilen 3 adet filtrenin yansıma kaybı ve araya girme kaybı sonuçları daha önce AWR ile elde edilen benzetim ile SP2 formatları çalıştırılarak aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Şekil 5.4’de görülen grafikte üretilen filtrelerin yansıma kayıpları ile tasarımı gerçekleştirilen filtrenin benzetim sonucunda elde edilen yansıma kaybı karşılaştırılması yapılmıştır. Benzetim sonucu “Lowpass” olarak adlandırılmış ve filtreler de 1, 2 ve 3 olarak numaralandırılmıştır.



Şekil 5.4. S_{11} Yansıma Kaybı sonuçlarının karşılaştırılması

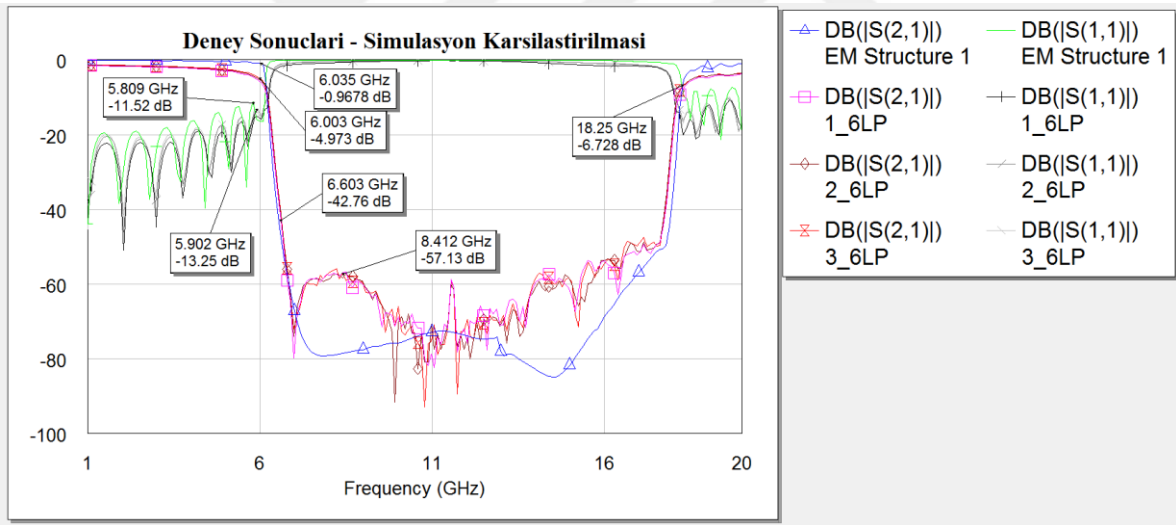
Yansıma kayıpları sonuçları üst üste örtüştüğünden, benzetim değerlerinin üretim sonrası filtrelerde de başarı ile elde edildiği görülmüştür. Bir diğer önemli nokta ise filtrelerin de kendi içlerinde tutarlı sonuçlar vermesidir. Bu da tasarımı gerçekleştirilen filtrenin tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda üretim adımlarının homojen olarak uygulandığının bir göstergesidir.

Minimum yansıma kaybı değeri benzetim sonucunda -12,15 dB iken bu değer filtrelerde -13,35 dB civarındadır. Değerler oldukça yakın olduğundan yansıma kaybı olarak bakıldığında sonuca ulaşılmıştır.

Yansıma Kaybı ve Araya Girme Kaybı sonuçları beraber incelendiğinde, Şekil 5.5’deki grafik ortaya çıkmaktadır. Benzetim sonucu “EM Structure 1” olarak adlandırılırken, üretimi

gerçekleştirilen filtreler 1, 2 ve 3 olarak numaralandırılmıştır. SP2 formatları çalıştırılan filtreler ve tasarım benzetimi Şekil 5.5'deki gibi S_{11} ve S_{21} sonuçları birlikte gösterilmiştir.

Yansıma kaybında olduğu gibi üretilen filtrelerin araya girme kaybı değerleri üst üste örtüşmüştür. Kendi içinde tutarlı olan filtre frekans cevabının benzetim değerine çok yakın olduğu gözlenmiştir. Her iki sonuçta da kesime hızlı bir şekilde gidilmekte ve 6-18 GHz gibi geniş bir bant aralığında frekans durdurma özelliğini göstermektedir. Benzetimde 6 GHz'de kesime giderken 0,97 dB kayıp gerçekleşirken, gerçekte bu değer üretim çıktısında 4,97 dB olarak ölçülmüştür. Tasarlanandan bir miktar daha fazla kayıp olmasına rağmen kullanılabilir değerler aralığında olduğundan başarılı bir sonuç elde edilmiştir. 6,6 GHz'de hedeflenen bastırma oranı 40 dB üzerindedir. Grafikte okunan değer benzetimde elde edilen değer ile aynı olup 42 dB civarındadır. Minimum bastırma oranı da 57 dB civarlarında olduğundan oldukça yüksek bir bastırma oranına sahip bir filtre üretilmiştir.



Şekil 5.5. S_{11} Yansıma Kaybı ve S_{21} Araya Girme Kaybı sonuçlarının karşılaştırılması

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, mikroşerit yapıda ve bastırma oranı yüksek bir alçak geçiren filtre tasarlanmış ve İnce Film Teknolojisi kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiştir. İnce Film Üretimi yönteminin tercih edilmesinin sebebi, bu teknoloji ile üretilen aygıtların daha küçük boyutlu olması, üretimin daha kolay olması ve sinyal kayıplarının diğer üretim yöntemlerine göre çok az olmasıdır.

İnce Film Üretim Teknolojisi'nin kendi içinde tanımlı ve halen geliştirilmekte olan birçok yöntemi mevcuttur. Bu yöntemlerden en yaygın ve kullanıma elverişli olanları tercih edilerek bu çalışma içerisinde detaylı olarak anlatılmıştır. Ayrıca, üretim manüel yöntem ile yapılarak laboratuvar ortamında ürünün daha az cihaz kullanılarak kimyasal kullanımlarıyla yapılabildiği gösterilmiştir.

Filtre tasarımında kullanılan en yaygın yaklaşımlardan Maximally Flat, Chebyshev ve Eliptik yaklaşımlar kullanılarak farklı tasarımlar geliştirilmiştir. Bu tasarımların kesim eğrisi, bastırma oranı ve üretime uygunluğu gibi parametreleri değerlendirilmiş ve üretime ve gereksinimlere en uygun olan Chebyshev polinomlu tasarımın üretilmesine karar verilmiştir.

6 adet filtre üretimi hedeflenmiş olup, üretim esnasında oluşan fire kayıpları nedeniyle 3 adet filtre üretimi başarıyla tamamlanmıştır. Bu filtreler test edilebilmesi için Mikrodalga Üretim altyapısı kullanılarak kuponlara dizilmiş ve tel bağlantısı yapılmıştır. Filtre üzerinde kullanılan desen ve test kuponu ile tel bağlantısı kayıpların en aza indirgenmesi amacıyla altın olarak tercih edilmiştir. Hazırlanan filtreler Vector Signal Generator cihazı kullanılarak 1-20 GHz aralığında test edilmiş ve test sonuçları AWR programında tasarlanan filtrenin benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmada filtrelerin frekans cevaplarının örtüştüğü ve istenilen değerlerin elde edildiği görülmüştür.

Hedeflenen değerler ve tasarlanan filtre sonuçlarına göre, filtrenin 6 GHz'de hızlı kesime gitmesi, 6,6 GHz'de 40 dB ve üzeri bastırma oranına sahip olmasıydı. Üretimi yapılan üç filtre de bu özelliği barındırmaktadır. Bu şekilde, filtrelerin tasarıma uygun üretildiği ve üretimin tekrarlanabilir olduğu gösterilmiştir.

Filtre tasarımlarında ideal filtreye en yakın tasarımın ortaya çıkması hedeflenir. Bunun için de geliştirilmiş farklı yaklaşımlar mevcuttur. Ancak tasarımda elde edilen sonucun pratikte de elde edilebilmesi için kayıpların en az seviyede olması gerekmektedir. Asıl önemli olan ise, üretilebilirliğin olmasıdır.

Tasarlanan filtre istenilen tüm değerleri karşılıyor ve kayıplar da dahil edildiğinde sınırlar dahilinde kalıyor olabilir. Ancak üretim için desen çıktısı alındığında hatların üretilebilir değerler dışında kalma ihtimali varsa, üretim parametreleri değiştirilerek istenilen hat kalınlığı elde edilene kadar deney tekrarlanmalıdır. Halen sonuç elde edilemiyorsa tasarım değişikliğine gidilmesi gerekmektedir. Bu tasarımda en ince hat kalınlığı 1 mil (25,4 um) değerine oldukça yakın, 1,2 mil kalınlığındaydı. Üretimde istenilen hat kalınlığı elde edildiğinden başarı ile sonuca ulaşılmıştır. Sadece hat kalınlığı değil, İnce Film Üretim’de uyulması gereken fakat bu tezde yer verilmeyen başka önemli tasarım kriterleri de mevcuttur. Bu nedenle tasarım yapılırken, bu ihtiyaçlar da göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Pozar, D. M. (1998). *Microwave Engineering* (4th edition), New York : John Wiley & Sons, Inc., 380-450.
2. İnternet : Fabian Kung Wai Lee. (2007). *RF/Microwave Filters*. URL : <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fpesona.mmu.edu.my%2F%7Ewllkung%2FADS%2Frf%2Flesson3b.pdf&date=2018-07-13>, Son Erişim Tarihi : 13.07.2018
3. Hong, J., and Lancaster, M. J. (2001). *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, Singapur : John Wiley & Sons Inc.
4. Korony, G. (2009). *Thin Film Filter Design and Technology* , South Carolina : Kyocera Group Company, Senior Member of Technical Staff.
5. Thede, L. (2004). *Practical Analog and Digital Filter Design* , Ohio : Artech House Inc.
6. İnternet: Darling, R.B., EE-527: MicroFabrication Photolithography. URL : [http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwecanfigurethisout.org%2FNANO%2Flecture%2Fnotes%2FMicrofabrication Supporting materials files%2FR_B Darling%2520-%2520Washington%2520U%2520-%2520Photolithography.pdf&date=2018-07-13](http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwecanfigurethisout.org%2FNANO%2Flecture%2Fnotes%2FMicrofabrication%2Fsupporting%2Fmaterials%2Ffiles%2FR_B_Darling%2520-%2520Washington%2520U%2520-%2520Photolithography.pdf&date=2018-07-13), Son Erişim Tarihi : 13.07.2018
7. İnternet : Microfabrication Laboratory, Lecture 4, Photolithography (I). URL : http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.ece.jhu.edu%2F%7Eandreu%2F495%2FArchives%2F2007%2FLectureNotes%2FHandout_PhotolithographyL.pdf&date=2018-07-13, Son Erişim Tarihi : 13.07.2018
8. Levy, R., and Seymour, B. (1984). *A History of Microwave Filter Research, Design, and Development*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-32, (9).
9. Gündüz, S., Çakır, G., Dibekçi, D., ve Sevgi, L. (2004). *Alçak Geçiren Mikroşerit Filtre Tasarımı, FDTD Analizi ve Gerçekleştirilmesi*, URSI, Bilkent, Ankara.
10. Hunter, I. (2001). *Theory and Design of Microwave Filters*, Londra : The Institution of Engineering and Technology.
11. Rajasekaran, K., Jayalakshmi, J., and Jayasankar, T. (2013). Design and Analysis of Stepped Impedance Microstrip Low Pass Filter Using ADS Simulation Tool for Wireless Applications, *International Journal of Scientific and Research Publications*.
12. Solanki, A., Sharma, N., and Kumar Gupta, H. (2015). Design of Microstrip Low Pass Filter for L-Band Application, *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 3(3), 212-215.

13. Chauhan, D., and Raval, F. (2016). Design of Microstrip Low Pass Filter, *International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering*, 3(4).
14. Kumar, P., and Chaturvedi, A. (2009). *Design and Analysis of Microstrip Elliptical Low Pass Filter*, International Conference on Emerging Trends in Electronic and Photonic Devices and Systems.
15. Selçuk, O., and Kızılbey, O. (2015). *Design and Realization of Different Microstrip Low Pass Filter Topologies by aid of AWR Microwave Office iFilter Wizard*, (2015), 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering.
16. Gadhvi, D., Patel, S., and Kosta, Y. (2013). *Elliptic Low Pass Filter Design using DGS Slot for Microstrip Lines*, Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE).
17. Boudaa, S., Challal, M., Mehani, R., and Rabahallah, D. (2015). *Miniaturized Ultra-Wide Stopband Microstrip Low Pass Filter Design*, 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE).
18. Günaslan, B., Çankaya, G., İrken, K., ve İmeci, T. (2017). Güngör, O., *Paralel Hat Mikroşerit Alçak Geçiren Filtre Tasarımı*, IEEE 25. Sinyal İşleme ve Uygulamaları (SIU) Kurultayı, Antalya.
19. Sheikhi, A., Alipour, and A., Abdipour, A. (2017). Design of Compact Wide Stopband Microstrip Low-Pass Filter Using T-shaped Resonator, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 27(2), 111-113.
20. Khutlang, R. (2006). *Design and Implementation of RF and Microwave Filters Using Transmission Lines*, Master's Thesis, University of Cape Town, Cape Town.
21. Bulut, M. (2009). *Seçiciliği Yüksek Bant Geçiren Filtre Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
22. Görür, A. (2016). *Modern Haberleşme Sistemleri İçin Çok Bantlı Ayarlanabilir Mikrodalga Filtre Tasarımı ve İki/Üç/Dört Bandlı Band Geçiren Filtre Uygulamaları*, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
23. Görür, A. (2011). *Çift Modlu Mikroşerit Bant Geçiren Filtre Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
24. Kazancı, N., Yüksel, B., ve Tahaimeci, Ş. (2015). *7 GHz Mikroşerit Alçak Geçiren Filtre*, Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU).
25. Aminu, A. (2014). *Design and Optimization of High Frequency Lowpass Filter on RO4003C Microstrip Using Maximally – Flat (Butterworth) Technique*, International Journal of Engineering Research and General Science.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TÜZÜN, Reşat
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 20.11.1988, Ş.URFA
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 592 25 63
 Faks : 0 (312) 354 13 02
 e-mail : rtuzun@gmail.com.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Yeditepe Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği	2012
Lise	M.T.S.O Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-Halen	Aselsan	Üretim Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayımlar

-

Hobiler

Kayak, Su sporları, Doğa yürüyüşleri



GAZİ GELECEKTİR..