



**Sb KATKILI Ge KRİSTALLERİN ELEKTROMANYETİK PARAZİT
PERDELEME ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Yunus ÇAT

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2018

Yunus ÇAT tarafından hazırlanan “Sb KATKILI Ge KRİSTALLERİN ELEKTROMANYETİK PARAZİT PERDELEME ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Aytunç ATEŞ

Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Bora ALKAN

Fizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Hakan ATEŞ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi:/...../.....

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora 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.

Yunus ÇAT

24/12/2018

Sb KATKILI Ge TEK KRİSTALLERİN ELEKTROMANYETİK PARAZİT
PERDELEME ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Yunus ÇAT

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2018

ÖZET

Bu tez çalışmasında, farklı katkı yoğunluklu üç adet Ge (111) tek kristali Czochralski tekniği ile 4 inç (102 mm) çapında büyütüldü. Büyütülen kristallerden dilimleme, taşlama ve parlatma işlemleri sonrasında elde edilen kızılötesi optik pencerelerin yapısal özelliği ve kızılötesi optik geçirgenliği belirlendi. Üretilen Ge pencerelerin kalınlık ve öz direnç etkileri göz önünde bulundurularak elektromanyetik parazit (EMI) perdeleme etkinliği incelendi. İlave olarak, bazı Ge optik pencereler üzerine metalik örgü, yansıma önleyici kaplama yapıldı ve optik geçirgenlik, EMI perdeleme performansı, ısıtıcı davranışı belirlendi. Metalik örgülerin şeffaf ısıtıcı davranışından yararlanarak, Ge optik pencerelerin sıcaklık bağımlı kızılötesi optik geçirgenlik değişimi izlendi. Ge optik pencerelerin iletkenlik ve kalınlığının artmasıyla EMI performansının arttığı gözlemlendi. Metalik örgüler sayesinde daha iyi bir EMI perdeleme ve ısıtıcı performansı elde edildi. Üretilen Ge pencerelerin, yüksek optik geçirgenliğe, yüksek EMI perdeleme ve ısıtıcı performansına sahip olması, kızılötesi görüntüleme sistemlerinde optik pencere olarak kullanımına elverişli olduğunu göstermektedir.

Bilim Kodu : 20227
Anahtar Kelimeler : Ge, metalik örgü, EMI kalkanlama, şeffaf ısıtıcı
Sayfa Adedi : 100
Danışman : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

THE DEVELOPMENT OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE PROPERTIES OF
Sb DOPED Ge CRYSTALS

(Ph. D. Thesis)

Yunus ÇAT

GAZI UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
December 2018

ABSTRACT

In this thesis, three Ge (111) single crystals with different dopant concentration were grown in 4 inch (102 mm) diameter by Czochralski technique. The structural properties and infrared optical transmittance of the infrared optical windows obtained after slicing, lapping and polishing of the grown crystals were determined. The electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness was determined by depending on the thickness and resistivity effects of the considered windows. In addition, metallic mesh, anti-reflective coatings were made on some of Ge optical windows and their effects on optical transmission, EMI shielding, heater behavior were evaluated. The temperature dependent infrared optical transmittance changing of the Ge optic windows were observed by utilizing the transparent heater behavior of the metallic mesh. The EMI performance of the Ge optical windows was enhanced with increasing conductivity and thickness. A better EMI shielding and heater performance has been achieved due to the metallic mesh. It is evaluated that produced windows having high optical transmittance, high EMI shielding and heater performance are suitable to use in infrared imaging systems.

Science Code : 20227

Key Words : Ge, metallic mesh, EMI shielding, transparent heater

Page Number : 100

Supervisor : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında her konuda yardımını ve desteğini esirgemeyen kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK' e, teşekkür ederim. Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini hiç esirgemeyen sevgili AİLEME sonsuz teşekkür ederim. Çalışmalarım esnasında yardımları ile beni destekleyen değerli hocalarıma, arkadaşlarıma, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi çalışanlarına ve Aselsan - MGEO çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Bu tez çalışması, TÜBİTAK 1505 programı kapsamında 5140074 nolu proje ile TÜBİTAK ve 2016K121220 nolu proje ile Kalkınma Bakanlığı tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Elektro-Optik Sistemler İçin Optik Pencereleer	5
2.2. Germanyum Optik Pencereleer	9
2.2.1. Kızılötesi optik için Ge tek kristali	10
2.3. Czochralski Kristal Büyütme Tekniği.....	12
2.3.1. Dislokasyonsuz büyütme için termal karakteristikler	14
2.3.2. Eksenel katkı dağılımı.....	15
2.3.3. İstenmeyen safsızlıklar	16
2.3.4. Kristal ve potanın dönme etkisi	17
2.4. Dilim Hazırlama	18
2.4.1. Dilimleme.....	18
2.4.2. Kimyasal aşındırma.....	19
2.4.3. Kenar yuvarlama	19
2.4.4. Yüzey taşılama	20

	Sayfa
2.4.5. Parlatma.....	20
2.4.6. Temizleme.....	21
2.5. Temel Kavramlar ve EMI Kalkanlama	22
2.5.1. Kalkanlama	24
2.5.2. Yakın alan-uzak alan kavramları	25
2.5.3. Elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama	26
2.6. Materyaller İçin EMI Kalkanlama Etkinliği Ölçüm Teknikleri.....	31
2.6.1. Eş eksenli TEM hücreleri.....	32
2.6.2. Anten ve elektrik-manyetik alan problemleri kullanılan ölçümler	37
2.7. Optik Pencereelerde EMI Kalkanlama Yöntemleri	42
2.7.1. Yarıiletken malzeme kullanımı	43
2.7.2. İnce film kaplama.....	44
2.7.3. Metalik örgü kaplamalar	44
3. KULLANILAN DENEYSEL TEKNİKLER.....	49
3.1. Numune Üretim Aşamaları	49
3.1.1. CZ kristal büyütme sistemi	49
3.1.2. Optik pencere elde edilmesi	54
3.1.3. Metalik örgü kaplaması.....	56
3.1.5. Fotolitografi işlemi.....	57
3.1.6. İnce film kaplama.....	58
3.2. Karakterizasyon Sistemleri	59
3.2.1. Hall etkisi ölçüm sistemi (HMS)	60
3.2.2. X-ışını kırınım sistemi	61
3.2.3. FTIR spektrometre	64

	Sayfa
3.2.4. EMI kalkanlama etkinliği ölçüm sistemi	65
3.2.5. Isıtıcı davranışını ölçümleri.....	66
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	69
4.1. Profilometre Kalınlık Ölçümleri	69
4.2. Ge Kristallerin Elektriksel Karakterizasyonu	70
4.3. X-Işını Kırınım Sonuçları	71
4.4. Isıtıcı Davranışı Ölçümleri	74
4.5. FTIR Geçirgenlik Sonuçları.....	78
4.6. EMI Kalkanlama Sonuçları.....	85
5. SONUÇLAR.....	91
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	99

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Büyütülen kristaller ve katkı miktarları.....	52
Çizelge 3.2. Hazırladığımız kare metalik örgü desenlerine ait g, l ve OT değerleri.	57
Çizelge 3.3. Yansıma önleyici kaplama parametreleri.	59
Çizelge 3.4. Bruker D8 Discover XRD cihazının teknik özellikleri.....	63
Çizelge 4.1. Oluşturulan numuneler için veri ve adlandırma tablosu.....	69
Çizelge 4.2. Numunelere ait öz direnç ve elektriksel yüzey direnci değerleri.	70
Çizelge 4.3. Büyütülen numunelere ait XRD verisi analizleri.....	72
Çizelge 4.4. ZnSe (111) kristal örgü parametreleri.....	74

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Atmosferin ve Ge pencerenin IR optik geçirgenliği.....	11
Şekil 2.2. CZ büyütme sistemine ait bir şema	13
Şekil 2.3. t/δ oranının soğurma kaybına göre değişimi.....	29
Şekil 2.4. ASTM ES7-83 metodu için (a) ölçüm hücresi ve (b) numune geometrisi	33
Şekil 2.5. ASTM D4935-99 standardı için (a) ölçüm hücresi ve (b) ölçüm numunesi. ...	34
Şekil 2.6. TEM-t hücresinin temsili gösterimi.....	35
Şekil 2.7. Çift TEM hücresi için bir şema	36
Şekil 2.8. MIL-STD-285 tekniğinde 1 GHz ve üzeri frekanslar için ölçüm şeması.....	38
Şekil 2.9. Serbest uzay metodu için ölçüm şeması.	39
Şekil 2.10. Yansıtma tekniğine ait ölçüm şeması.	40
Şekil 2.11. Yakın manyetik alan tekniğine ait bir şema	41
Şekil 2.12. 10 Ω .cm öz direnç ve 5 mm kalınlıkta Ge için soğurma kaybı.	43
Şekil 2.13. Kare metalik örgü yapısına ait g ve l parametreleri.....	44
Şekil 2.14. Metalik örgü desenleri örnekleri, (a) periyodik dairesel, (b) uç uca yarım daire.....	45
Şekil 2.15. Rastgele dağılımlı çember ve çizgi geometrisi	46
Şekil 3. 1. CGS-Lab-Ge sistemi.....	50
Şekil 3. 2. SE test cihazının numune ölçüm geometrisi ve boyutları	57
Şekil 3. 3. X-ışınlarının kristal içindeki atomlardan veya iyonlardan saçılması.	62
Şekil 3. 4. 5 V altında farklı direnç değerleri (0,5 - 20 Ω) için oluşacak güç değişimi ..	67
Şekil 4. 1. (a) N1, (b) N2 ve (c) N3 numunelerine ait X-ışını kırınım desenleri	72
Şekil 4. 2. (a) N5 ve (b) N8 için X-ışını kırınım desenleri	73
Şekil 4. 3. N5 ve N8 X-ışını kırınım deseninin birlikte gösterimi	73

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. N4 numunesinin farklı gerilim değerleri altında zamana bağlı sıcaklık değişimi	75
Şekil 4.5. N6 numunesinin farklı gerilim değerleri altında zamana bağlı sıcaklık değişimi	75
Şekil 4.6. N4 ısıtıcı davranışı ölçümü sırasında sıcaklığa bağlı direnç değişimi.....	76
Şekil 4.7. N3 numunesinin ısıtıcı davranışı.....	77
Şekil 4.8. N3 ve N4 numunelerinin ısıtıcı davranışı kıyaslaması	78
Şekil 4.9. Farklı kalınlık ve öz direnç değerindeki optik pencerelerin optik geçirgenliği.....	79
Şekil 4.10. Metalik örgünün IR optik geçirgenlik ölçümü ve beklenen değeri	79
Şekil 4.11. ZnSe' nin dalga boyuna göre kırılma indisi	80
Şekil 4.12. Yansıma önleyici kaplama öncesinde ve sonrasında IR optik geçirgenlik..	81
Şekil 4.13. N4 ve N6 numuneleri için IR optik geçirgenlik.	82
Şekil 4.14. N4 numunesinin sıcaklık bağımlı IR optik geçirgenliği.....	83
Şekil 4.15. N4 numunesinin sıcaklığa göre soğurma bandı kayması	83
Şekil 4.16. N6 numunesinin sıcaklık bağımlı IR optik geçirgenliği.....	84
Şekil 4.17. N6 numunesinin sıcaklığa göre soğurma bandı kayması	85
Şekil 4.18. (a) lineer ve (b) logaritmik skalada SE sonuçları	86
Şekil 4.19. Büyütülen numunelerin frekansa göre δ değeri	87
Şekil 4.20. N1 ve N7 numunelerinin 500 MHz- f_m değeri arasındaki SE sonuçları.....	88
Şekil 4.21. N2 ve N3 numunelerinin 500 MHz- f_m değeri arasındaki SE sonuçları.....	88
Şekil 4.22. N3 ve N4 numuneleri için SE sonuçları	89
Şekil 4.23. N3 ve N4 numuneleri için logaritmik skalada SE sonuçları.....	90

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Farklı boyutlarda Ge kızılötesi pencereler.....	10
Resim 3.1. Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan CZ sistemi.....	51
Resim 3.2. Meyer Burger DW dilimleme sistemine ait bir resim.....	55
Resim 3.3. Logitech LP50 taşlama ve parlatma cihazından bir görüntü.	56
Resim 3.4. NVT-500 eş odaklı püskürtme sistemi	58
Resim 3.5. (a) Au örgü kaplamanın mikroskop görüntüsü ve (b) Au örgü kaplanmış SE ölçüm seti.....	59
Resim 3.6. Lakeshore 7700 serisi Yüksek Empedans Hall etkisi ölçüm sistemi	61
Resim 3.7. Bruker D8 Discover XRD cihazından bir görüntü.....	63
Resim 3.8. Vertex 80 spektroskopi cihazından bir görüntü.....	64
Resim 3.9. 1 inç çaplı eş eksenli SE test aparatı.....	65
Resim 3.10. Isıtıcı davranışını belirlediğimiz test düzeneği.....	67
Resim 4.1. Au örgüye ait kalınlık profil ölçüm görseli	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Ge	Germanyum
Sb	Antimoni
ZnS	Çinko sülfür
ZnSe	Çinko selenit
Si	Silisyum
MgF₂	Magnezyum florür
eV	Elektron volt
μm	Mikro metre
c_s	Katı içindeki katkı yoğunluğu
c₀	Eriyik katkı yoğunluğu
k_{eff}	Etkin ayırma sabiti
Au	Altın
A	Soğurma kaybı
R	Yansıma kaybı
B	Çoklu yansıma kaybı
δ	Tabaka derinliği
g	Çizgiler arası boşluk
l	Çizgi genişliği
λ	Dalga boyu
σ	İletkenlik

Kısaltmalar**Açıklamalar**

Z₀	Boşluğun empedansı
ADC	Otomatik çap kontrolü
ALON	Alüminyum oksinitrür
CMP	Kimyasal-mekanik parlatma
CZ	Czochralski
dB	Desibel
DI	Deiyonize
DLC	Karbon benzeri kaplama
EMC	Elektromanyetik uyumluluk
EMI	Elektromanyetik girişim
FWHM	Tam genişlikteki yarı yükseklik
IA	İlave zayıflama
IR	Kızılötesi
LWIR	Uzun dalga kızılötesi
MWIR	Orta dalga kızılötesi
OT	Optik geçirgenlik
RF	Radyo frekansı
SE	Kalkanlama etkinliği
SWIR	Kısa dalga kızılötesi
TEM	Enine elektromanyetik
VNA	Vektör ağ analizörü

1. GİRİŞ

Yarıiletken tek-kristal külçe elde edilmesinde çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Czochralski [1], Eriyen Bölge, Bridgman [2] ve Kryopolous [3] bu tekniklerden en çok kullanılanlarıdır. Elektro-optik kalitede büyük çaplı Germanyum (Ge) tek kristalleri günümüzde daha çok Czochralski (CZ) tekniği kullanılarak büyütülmektedir. CZ yöntemi ile Ge tek kristali ilk defa 1950’de Bell Laboratuvarında, Teal ve Little tarafından büyütüldü [1]. Gelişen teknoloji sayesinde bilgisayar kontrollü büyütme sistemleri ile birlikte Ge tek kristalleri mükemmel kristal kalitesinde büyütülebilmektedir. Bu teknikte 300 mm çapa kadar tek kristal külçe büyütülebilmektedir. Bu yöntem, eriyik haldeki malzemeye rehber kristalin daldırılması ve döndürerek yukarı çekildikçe kristalleşmesi işlemidir. Uygun sıcaklık değeri ve düzgün bir soğutma yaparak sıvı-katı ara yüzeyde kristalleşme gerçekleşecektir. Oluşan kristal, çekirdek kristalin kopyası olacaktır. Kullanım amacına göre büyüyen kristalin saflığı, içindeki katkı miktarı, katkı türü (p-tip, n-tip) büyütme işlemi öncesinde belirlenir. Yarıiletken külçe kristallerin birçoğu bu yöntem kullanılarak elde edilir.

Ge tek kristalleri, yüksek saflıkta çoklu kristalden, tek kristal külçe büyütme işlemi sonrasında elde edilir. Tek kristal olarak kristalleşmesinin ardından külçe, amacına uygun şekilde dilimlere ayrılarak kullanılır. Sonrasında taşlama, parlatma gibi yöntemlerle optik pencere haline getirilir.

Ge üstün optik özellikleri nedeniyle, kızılötesi (IR) görüntüleme sistemlerinde genellikle tercih edilmektedir. Atmosferin IR bölgedeki geçirgenliğinin, Ge’ un optik geçirgenliği ile örtüşmesinden dolayı orta dalga kızılötesi (MWIR) ve uzun dalga kızılötesi (LWIR) sistemlerde optik pencere veya kubbe olarak kullanılmaktadır [4,5]. Genellikle IR optik geçirgenliği artırmak için yansıma önleyici kaplamalar, çeşitli tekniklerle ve malzemelerle yapılmaktadır.

IR ışınının alıcıya ulaşması için ön girişte büyük optik açıklıklar gerektiğinden, mevcut IR görüntüleme sistemleri elektromanyetik parazit (girişim) (EMI) etkilerine oldukça duyarlıdır. Girişim oluşturacak elektromanyetik radyasyonunun önemli bir miktarı bu optik açıklıktan içeri girer ve IR alıcıyı etkiler. EMI etkilerden korumak için elektronik destek teknikleri, alıcının performansını ciddi derecede bozmaktadır. IR sistemin istenilen aralıkta

düzgün çalışabilmesi ve EMI perdeleme (kalkanlama) özelliğinin bulunması gerekmektedir [6]. IR görüntüleme sistemi üzerindeki bu olumsuz etki, EMI' den korumak için üretilmiş, elektro-optik bileşenlerin önündeki optik pencerenin kullanılarak azaltılması en elverişli yoldur. Bunun için farklı EMI kalkanlama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler; yarıiletken optik pencereler için, büyütme sırasında iletkenlik değerinin optimize edilmesi şeklinde yapılırken, iletkenliği olmayan pencereler için üzerine çeşitli kaplamalar yapılarak sağlanmaktadır [7, 8, 9].

Elektro-optik sistemlerde optik pencerenin EMI kalkanı olarak davranması ve yüksek optik geçirgenlikli olması temel amaçtır. Görünür ve yakın kızılötesi uygulamalarında EMI kalkanlayıcı olarak şeffaf iletken oksit kaplamalar genellikle ilk tercih edilen malzemedir ancak orta ve uzun kızılötesinde güçlü bir soğurucu olmasından dolayı bu bölgelerde kullanışlı değildir [10,11]. Metalik örgüler, MWIR ve LWIR bölgeleri için optik kayıp oluştursa da iyi bir tasarımla hem yüksek optik geçirgenlik hem de iyi bir EMI kalkanlama performansı elde edilebilmektedir [12,13]. Ayrıca pencere olarak safir ve ZnS gibi malzemelere bazı uygulamalarda alternatif olan yarıiletken Ge kullanıldığında, büyütme sırasında iletkenlik değerinin iyi bir şekilde optimize edilmesiyle yüksek optik geçirgenlik ve yüksek EMI kalkanlama değeri elde edilebilmektedir.

Malzemelerin EMI kalkanlama etkinliği (SE) değerini belirleyebilmek için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Ürün tasarlama aşamasında, ürünün elektromanyetik uyumluluk (EMC) şartlarına uygun bir şekilde üretilmesi, malzemelerin SE değerinin doğru bir şekilde belirlenebilmesiyle mümkün olmaktadır. Aksi durumda, EMC testleri sırasında ürünün birçok kez başarısızlığa uğraması söz konusu olacaktır [14].

Ayrıca, EMI kalkanlamanın yanı sıra buz-buğu önleme uygulamaları da optik pencere tasarımlarında dikkate değer bir konu olmuştur. Düşük sıcaklık ve nemli ortamlarda oluşabilecek buzlanma veya buğulanma, pencerenin ısıtıcı davranışını zorunlu kılmaktadır. Isıtıcı davranışı, ya doğal iletkenliği olan bir malzeme kullanımıyla ya da üzerine yapılan şeffaf ve iletkenliği yüksek kaplamalar ile sağlanabilir. Yarıiletken pencereler ısıtıcı amaçlı kullanılabilir. Ancak yüksek miktarda güç tüketimi olmaktadır. Metalik örgüler ise düşük iletkenliği ve yüksek optik geçirgenliği sayesinde şeffaf ısıtıcı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [15, 16].

Bu tez çalışması kapsamında CZ tekniği ile farklı katkı yoğunluklu üç adet Ge tek kristali büyütüldü ve büyütülen kristaller dilimleme-taşlama-parlatma işlemlerinden sonra optik pencere haline getirildi. Bazı optik pencereler üzerine, yüksek optik geçirgenlik dikkate alınarak tasarımı yapılan metalik örgü kaplaması yapıldı. Ayrıca, bazı Ge optik pencereler üzerine yansıma önleyici kaplama yapıldı. Üretilen farklı optik pencerelerin analizleri yapıldı. Bu amaçla üretilen optik pencerelerin; kristal kalitesi, EMI kalkanlama etkinliği, kızılötesi optik geçirgenliği, ısıtıcı davranışı belirlendi. Ayrıca Ge için sıcaklık bağımlı kızılötesi optik geçirgenlik ölçümleri, ısıtıcı davranışından yararlandığımız metalik örgüler kullanılarak gerçekleştirildi.

Tez çalışması aşağıdaki şekilde organize edilerek sunuldu:

Birinci bölümde tez çalışmasının genel amacı ve ilgili literatür araştırmaları birlikte sunuldu. İkinci bölümde kızılötesi pencereler, Ge ve üretim tekniği, EMI- EMC kavramları, malzemeler için SE belirleme yöntemleri ve optik pencereler için EMI kalkanlama yöntemleri gibi bilgilerden bahsedildi. Üçüncü bölümde tüm deneysel çalışma ve bu süreç boyunca kullanılan üretim ve analiz sistemleri anlatıldı. Dördüncü bölümde araştırma bulguları tartışıldı ve son olarak beşinci bölümde de elde edilen sonuçlar verilerek, konuyla ilgili öneriler sunuldu.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde çalışmamız kapsamında bazı kızılötesi optik materyallerden ve Ge' dan, CZ kristal büyütme tekniğinden, EMI – EMC kavramlarından, materyaller için bazı SE ölçüm yöntemlerinden ve elektro-optik sistemler için EMI kalkanlamadan bahsedilecektir.

2.1. Elektro-Optik Sistemler İçin Optik Pencereleler

Optik pencere tasarımı ve malzeme / kaplama seçimleri, elektro-optik sisteminin performans gereksinimleriyle sağlanır. Görüntüleme sistemi içerisinde yer alan alt sistem açıklıkları, görüş alanları, ilgilenilen spektral bölge sayısı ve özellikle düşük görünürlüğe bağlı olarak, aynı sistemde farklı pencereler kullanılabilir. Çoklu spektral alıcılara (hem IR hem de görünür bölge gibi) yönelik olarak, bu bölgeler için tek bir pencere kullanımı gerekecektir. Eksen hareketli ve geniş spektral bölgesi görüş alanına sahip stabilize sistemler, genellikle kubbe veya bölümlere ayrılmış pencere gerektirir [4]. Pencere yapısı seçimi ihtiyaçlar doğrultusunda optik, mekanik vb. gereksinimler göz önünde bulundurularak belirlenir.

Ancak çoklu spektral bölgeye uygun pencere malzemeleri nispeten azdır. Yüksek optik geçirgenliği, geniş spektral bölgelerde ve yüksek geliş açılarında gerektiren optik kaplamalar da büyük zorluklar içermektedir. Buz - buğu önleme için ısıtılmalı pencereler, yüksek hız nedeniyle soğutucu pencereler ve EMI kalkanları ek tasarım gereksinimleri olabilir. Optik pencerelerin, yanıtıcı bir şekilde basit görünmekle birlikte, bir elektro-optik sisteminin en pahalı optik bileşenini temsil etmesi, tüm bu gereksinimlerden dolayı şaşırtıcı değildir [4].

Aşağıda, elektro-optik sistemler için yaygın olarak kullanılan bazı optik materyaller hakkında temel bilgiler yer almaktadır.

Optik camlar, yaklaşık 0,3 ile 2,5 μm dalga boyu aralığı için elverişlidir. ZKN7 genellikle düşük termal genleşmesi ve düşük yoğunluğundan dolayı için tercih edilir.

Kuvars, yaklaşık 0,2 ile 3 μm dalga boyu aralığında geçirgen, ilave dayanıklılık ve düşük termal genleşmeden dolayı tercih edilebilecek bir malzemedir [4].

Magnezyum Florür (MgF_2) uzun dalga kızılötesi (LWIR) hariç (yaklaşık 130 nm ile $9\mu m$) geniş bir bant aralığında mükemmel optik geçirgenliğe sahiptir. MgF_2 çok düşük bir kırılma indeksine sahiptir ve en tipik uygulamalarından biri, yansıma önleyici kaplama uygulamasıdır. MgF_2 dayanıklı bir malzeme olup kimyasal aşınmaya, darbeye (termal ve mekanik) ve bir kaplama malzemesi olarak kullanılmasının bir başka nedeni olan lazer hasarına karşı dayanıklıdır. MgF_2 , küçük boyutlarda üretildiğinde diğer materyallere göre fazla maliyetli değildir, ancak artan boyutu, ZnS ve ZnSe maliyetine yaklaştırır [17].

Safir, çeşitli görüntüleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Görünür, SWIR ve MWIR ($0,15 - 5 \mu m$) bölgeleri için iyi bir optik geçirgenliğe sahiptir. Safirin en büyük faydalarından biri, çok güçlü ve dayanıklı olmasıdır. Bu nedenle, birçok uygulamada gerilme ve gerinim gereksinimlerini karşılamak için diğer malzemelerden daha ince hale getirilebilir. Safir, iki nedenden ötürü daha pahalı malzemelerden biridir. Birincisi, bir kristal büyütme işleminden geçerek elde edilmesidir. İkincisi ise çok sert olduğu için işlemek oldukça zordur. Safir genellikle yüksek ısı veya yüksek basınç uygulamalarında kullanılır [17].

ALON (Alüminyum oksinitrür) geniş bir spektrumda şeffaf seramik bir malzemedir. ALON, mor ötesinden MWIR' a ($0,22 - 6 \mu m$) kadar kullanılabilir. ALON, safir ile mukavemet bakımından çok benzerdir, ancak MWIR bandı sonunda safir veya spinelden daha büyük bir optik geçirgenlik kaybı yaşar. ALON bir seramik olduğundan, soğuk izostatik presleme, kalıp döküm veya enjeksiyon kalıplama ile üretilir. Bunlar seramik malzemeler için standart işlemlerdir. Bu, ALON' un safirden daha ucuz olmasını ve daha karmaşık şekiller elde edilmesini sağlamaktadır. ALON genellikle görüntüleme uygulamaları için safirin daha düşük maliyetli bir alternatifi olarak kullanılır. Bir başka potansiyel uygulama alanı ise şeffaf balistik zırhlardır.

Spinel ($MgAl_2O_4$), yaklaşık $0,25 - 6,5 \mu m$ dalga boyuna kadar şeffaftır. Saydam bir seramik malzeme olması yönüyle ALON' a da çok benzerdir ve her ikisi de yaklaşık aynı optik bölgede geçirgendir. Seramik malzemelerden olan Spinel, soğuk izostatik presleme, kalıp döküm veya enjeksiyonla kalıplama gibi seramik malzemeler için standart üretim teknikleri ile üretilir. Bu, nedenle tıpkı ALON gibi safirden daha ucuz ve daha karmaşık şekiller yapılabileceği anlamına gelir.

Çinko sülfür (ZnS) üstün mukavemeti (örneğin yağmur erozyonu) ve daha düşük maliyet

için tercih edilir. Yansıma önleyici kaplama ile kaplandığında, SWIR, MWIR ve LWIR (yaklaşık 0,6 ile 14 μm) gibi geniş bir aralıkta kullanılabilir. Birçok görüntüleme ve lazer uygulamasında ortak bir pencere açıklığı için ZnS elverişli bir malzemedir. Ayrıca, düşük soğurmaya sahip kalın bir ZnSe alttaş ile mekanik etkilerden koruyucu olarak ZnS tabakasının (yaklaşık 1 mm kalınlığında) birleştirildiği pencere uygulamaları mevcuttur [4].

Çinko selenit, (ZnSe) geniş bantlı görüntülemeyi destekleyen bir malzemedir. ZnSe' nin çinko sülfürden mekanik olarak daha zayıf olması ve AR kaplaması olmadığında düşük geçirgenliği nedeniyle genellikle MWIR ve LWIR görüntülemeyi desteklemek için yansıma önleyici kaplanmalıdır. Dayanıklılık sorunları ile birleştğinde kullanımının, sadece geniş bant aralıklı optik açıklığa sahip görüntüleme ve lazer kullanımı gerektiren uygulamalarda, dış yüzeyin ZnS ile kaplandığı bir sistemle sınırlandırmak en iyisidir.

Silikon (1,8 – 8 μm) genellikle MWIR görüntüleme için kullanılır. LWIR bölgesi için elverişli değildir. Yarı iletken olduğu için doğal EMI kalkanlayıcı ve ısıtma yetenekleri ile buz-buğu çözme ve önlemeye elverişlidir [4,17].

Germanyum (2 – 16 μm) MWIR ve LWIR uygulamaları ile için elverişli yarıiletken bir malzemedir. Yüksek bir kırılma indisine sahip olan Ge iyi bir optik geçirgenlik için yansıma önleyici katman ile kaplanmalıdır. Optik geçirgenliğinde sıcaklığa bağlı ciddi derecede kayıplar olduğu için düşük sıcaklıklar için uygundur. Genellikle 100 ° C ve altındaki sıcaklık koşullarında tercih edilir. Si' dan daha dayanıklı ve çok daha yoğun bir malzemedir. Ancak yoğunluğundan dolayı görüntüleme sistemi için fazladan ağırlık oluşturacaktır. Üretim ve işleme yöntemleriyle birlikte maliyeti artmaktadır. Çok dayanıklı bir malzemedir ve düşük sıcaklıklar gibi birçok zorlu ortamda kullanılabilir [17]. Ayrıca Si içinde geçerli olan doğal EMI kalkanlayıcı ve ısıtma yeteneklerinden dolayı tercih sebebidir.

Özellikle füze kubbeleri için üstün sertlik ve mukavemet sunan sentetik elmas pencereler de geliştirilmektedir. Ancak bu pencerelerin boyutları sınırlıdır, henüz görünür bölge geçirgenlikleri yoktur ve MWIR bölgesinde soğurum oluşturmaktadırlar [4].

Pencerelerin kalınlığı; elastiklik, bükülme, kırılma, vb. malzemenin fiziksel özelliklerine, aerodinamik yük, ivme, titreşim, sıcaklık vb. gibi çevresel etkenlere ve optik performans gereksinimlerine bağlı olarak belirlenir.

Pencerelerin montajında, pencerenin ve çerçevenin sıcaklıkla genişleme değişimi dikkate alınmalıdır. Bu durum, çerçeve malzemesini (genellikle elastik polimer) ve çerçeve ile pencere arası boşluk miktarını belirler. Elastik polimerler genellikle oda sıcaklığında sertleştirilir ve ısıtma için elektriksel iletkenlik gerektiren durumlarda bağlantılar yapılarak kullanılır.

Pencereler farklı uygulama amaçlarına ve gerekliliğine göre kaplanmaktadır. Bunların başında: yansıma önleyici, dayanıklılık, ısıtma, EMI kalkanlama ve düşük görünürlük özellikleri gibi ihtiyaçlar gelmektedir. Bunlardan kısaca bahsedelim.

Dış yüzeylerdeki AR kaplamaları, genellikle kum / toz akışı ve yağmurun neden olabileceği negatif çevre etkilerine dayanacak şekilde olmalıdır. Sert karbon ve bor fosfat gibi elmas benzeri kaplamalar (DLC) büyük ölçüde uzun servis ömrü sunar. Ancak, DLC' ler optik soğurucu olarak davranırlar ve bu nedenle optik geçirgenliği azaltırlar.

Elektriksel olarak iletken olmayan pencere alt tabakalarının ısıtılması, iletken filmlerin veya örgü desenlerinin bir yüzey üzerinde kaplanmasıyla gerçekleştirilir. Ayrıca ısıtıcı kısmi iletken tabakaların, alttaş içine gömülmesiyle de (ZnS/ısıtıcı/ZnSe) gerçekleştirilebilir. Genellikle metalik örgü malzemesi olarak nikel-krom (NiCr) kullanılır.

Germanyum ve silisyum doğal yarıiletkenlerdir ve bu malzemelerden oluşan pencereler, bunların içinden geçen akım ile ısıtıcı davranışı sergileyebilirler. Düzensiz geometri şekillerindeki pencereler için homojen ısı dağılımı, düzgün yerleştirilen kontak bağlantıları yapılması ile mümkündür. Polikristal malzeme kullanımı, pencereyi homojen olmayan bir malzeme haline getirecek ve optik geçirgenlikte, ısıtıcı sonuçlarında etkili olacaktır. Ayrıca, pencere malzemesinin çerçevesinden elektriksel yalıtım sağlanmış olmalıdır. Tasarlanan ürünün ısıtıcı davranışı sergileyecek pencereye sahip olması, sıcaklık bağımlı optik geçirgenlik testinin belirlenmesini de gerektirmektedir [4].

Süpersonik uçuş uygulamalarında kullanılacak olan pencereler için aşırı termal etkilerden kaynaklanan bozulmayı önlemek için, sıvı azot püskürtmesi veya başka yollarla soğutulması gerekebilir.

Elektromanyetik kalkanlayıcı özelliği, yarı iletkenlerde doğal olarak gerçekleşmektedir. Direnç azaldıkça EMI performansı artacaktır, ancak daha düşük direnç malzemesi de daha düşük optik geçirgenlik oluşturacaktır. İletken olmayan alttaşlar için EMI kalkanlama, metalik örgüler kullanılarak, istenen frekans aralığı ve istenen kalkanlama değeri gibi, bazı temel parametreler belirlenerek tasarlanmaktadır. Metalik örgü desenler, görüntüde negatif etkiye sebep olabilmektedir. Bu nedenle iyi bir optik tasarım yapılmalıdır. Ayrıca EMI örgüleri, pencere çerçevelerine iletkenlerle bağlı olmalıdır.

Gerekli radyo frekansı (RF) görünürlüğü azaltmak için düşük gözlemlenebilir olan farklı yüzey desen uygulamaları seçilebilir. Optik geçirgenlik kayıpları minimum düzeyde olacak şekilde, kırınım etkileri hassas bilgisayar programları ve Fraunhofer (uzak alan) analizleri ile değerlendirilerek tasarımlar gerçekleştirilir. Bu tasarımda oluşacak kırınım deseninin merkez nokta yoğunluğu fazla etkilenmeyecektir ve merkezin etrafındaki kırınım desen noktaları ise iyi bir tasarımla sistem performansının bozulmadan çalışmasını sağlayacaktır.

Yukarıdaki değerlendirmelerden, olası test gereksinimlerinin bir listesi oluşturulabilir. Bu testlerin başında; optik, elektrik, mekanik ve gerekli durumlarda nükleer-biyolojik-kimyasal (NBC) testleri, radyoaktivite testleri gibi testler yapılmaktadır. Optik testler; geçirgenlik, geçirgenlik aralığı, farklı açı görüntüleri, polarizasyon, görüş açısı gibi testlerdir. Elektrik testleri ise güç tüketimi, ısıtma-soğutma, EMI kalkanlama, düşük görünürlük testleri vb. içermektedir. Dayanıklılık testleri genel olarak pencere dayanıklılığı, çalışma ve depolama koşullarında kaplama dayanıklılığı ve yapışma, nem, sıcaklık değişimi testleri, yükseklik, basınç, titreşim, ivme, şok, yağmur-toz aşınmasına karşı dayanıklılık, kimyasal dayanıklılık, asitler, çözücüler, jet yakıtı vb. şeklinde yapılmaktadır. Çalışma şartlarına göre radyoaktivite testleri de uygulanmaktadır [4]. Bu testler kullanım alanına göre değişecektir. Bazı özel tasarımlar ise mutlaka kendine özgü testler gerektirecektir.

2.2. Germanyum Optik Pencereleer

Ge yörüngesinde 32 elektron barındırmaktadır ve 4 adet valans elektronuna sahiptir. Doğal yarıiletken olan katkısız Ge' un 302 K' de yasak enerji aralığı 0,67 eV dur. Ge dört valans elektronuna sahip olduğundan beş valans elektrona sahip bir katkı atomu ile katkılандığında bir elektron fazlalığı olacaktır ve n-tip Ge oluşur. Eğer üç valans elektronuna sahip bir katkı atomu ile katkılanırsa bir elektron eksikliğinden yani bir deşik oluşacağından p-tip Ge elde

edilmiş olur. Ge optik pencereler, optik soğurma kaybını minimize etmek için n-tipi elde edilirler. Genellikle optik sınıfta, büyük çaplı ve kaliteli bir Ge kristali elde etmek için CZ tekniği kullanılır.

2.2.1. Kızılötesi optik için Ge tek kristali

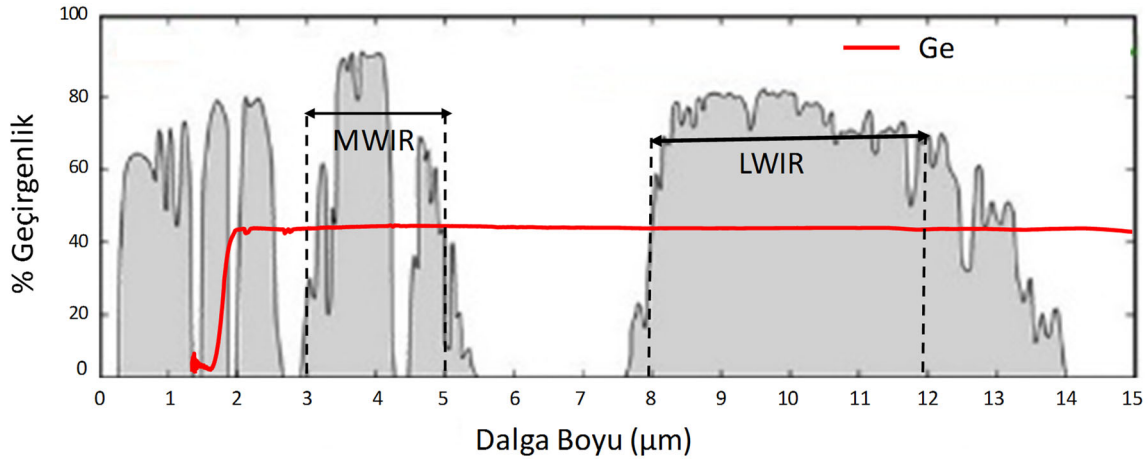
Ge atmosferik geçirgen bölge olan 3-5 μm ve 8-12 μm dalga boyu aralığında yüksek bir geçirgenliğe sahiptir [18]. Bu yüzden Ge, MWIR ve LWIR görüntüleme sistemlerinde mercek veya Resim 2. 1’ de görüldüğü gibi optik pencere olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.



Resim 2. 1. Farklı boyutlarda Ge kızılötesi pencereler

Ge, optik pencere haline gelmeden önce, yüksek saflıkta elde edilmeli ve sonrasında kristal büyütme yöntemleriyle tek kristal haline getirilmelidir. Yüksek saflıkta külçe elde etmek için sıvı-katı ara yüzeyde safsızlıkların ayırma özelliği kullanılarak saflaştırma işlemi gerçekleştirilir. Saflaştırılan çoklu kristal külçelerin elektriksel aktif kirlilik yoğunluğu genelde 10^{13} cm^{-3} ‘ün altında olduğunda elektronik ve optik kalitede üretim için kullanılır [18]. Tek kristal külçe, yüksek saflıkta elde edilen Ge’ un genellikle, eriyikten çekme yöntemlerinden olan CZ tekniği ile elde edilir.

Ge erime sıcaklığının düşük (937°C) olması ve bu sıcaklıktaki buhar basıncının çok düşük olması, ayrıca pota olarak kullanılan malzemeler (grafit veya kuartz) ile neredeyse hiç etkileşmemesi sebebiyle CZ tekniği ile üretilen ilk malzemelerden biri olmuştur [18].



Şekil 2.1. Atmosfer ve Ge pencere için IR optik geçirgenlik.

Ge, 2-15 μm dalga boyu aralığında Şekil 2.1’ de görüldüğü gibi geçirgen olmasına rağmen, kristal içindeki serbest taşıyıcıların soğurma etkisi, sıcaklıkla birlikte artacağından bu aralıkta geçirgenlik azalmaktadır. Bu soğurmayı minimize etmek için; kristal n-tipi katkılı ve katkı yoğunluğu 5×10^{13} ile $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ arasında olmalıdır. Bu katkı yoğunluğu yaklaşık 5 - 40 $\Omega \cdot \text{cm}$ öz dirence karşılık gelir [19]. Bu özellikteki Ge kristali için oda sıcaklığında 0.02 cm^{-1} veya daha düşük bir soğurma katsayısı elde edilir. Optik kalitede Ge, izotropik (eş yönlü) ve tek tip olmalı, yani çift kırınım minimize ($< 1 \mu\text{m/cm}$) ve kırılma indisinin homojenliği çok yüksek (tipik olarak $\Delta n < 10^{-4}$) olmalıdır. Yüksek optik geçirgenlik ve homojenlik, mozaikliğin minimum olmasını ve düşük açı bölge sınırlarını gerektirir. Ayrıca, düşük çift kırınım, kristal içerisindeki kalıntı gerilmelerin minimum olmasıyla sağlanır [20].

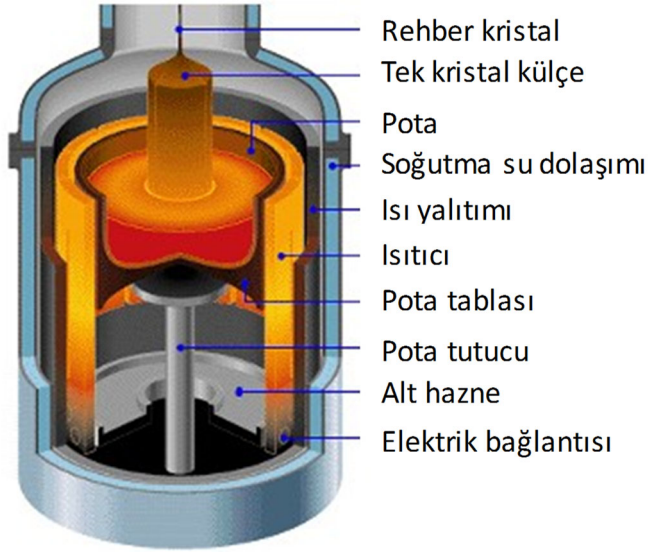
Kristal içerisinde kalıntı gerilmeler, kristal oluşumu sırasında sıvı-katı ara yüzeyi üzerindeki kristalin soğuması sırasında kritik kesme gerilimini aşan termal gerilmelerin gevşemesiyle oluşan, plastik gerilme (kalıcı deformasyon) sonucudur. Plastik gerilme ise kusurların hareketi, çoğalması ve yayılması sayesinde oluşur. Termal gerilmeleri minimize etmek için, sıvı-katı ara yüzeyi mümkün olduğunca düz tutulmalıdır (iç bükme ya da dış bükme olmamalıdır). Sıvı-katı ara yüzeyin düz olması yalnızca radyal sıcaklık eğrisini ortadan kaldırmakla mümkün olmaktadır. Bu şartlar, eriyik yüzeyi üzerindeki ısıtıcılarla veya ısı kalkanlarının doğru kullanılmasıyla sağlanır. Bunun için kristal büyütme yönteminde kullanılan sistem ve sıcak bölge tasarımı iyi bir şekilde optimize edilmelidir. 35 cm çapa kadar tek kristal bu yöntemle büyütülebilir [18].

2.3. Czochralski Kristal Büyütme Tekniği

CZ yöntemi, günümüzde büyük çaplı kristallerin büyütülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [21]. 1960' ların sonlarında dislokasyonsuz büyütme tekniğinin ve otomatik çap kontrolünün (ADC) gelişimi, kristalin çap değerinin hızlı bir şekilde artmasına neden olmuştur. Günümüzde 200 kg ağırlığındaki 300 mm çapında silikon kristaller büyütülmekte ve 450 mm çaplı kristal dönemine hazırlık yapılmaktadır [22].

CZ kristal büyüme süreci birçok değişken tarafından kontrol edilir. Isı transferleri ve malzeme faz geçişleri gibi temel değişkenler bunlardan bazılarıdır. Modern CZ kristal büyütme sistemi, bu işlemi bir mühendislik disiplinine dönüştürmüştür. Büyüme sürecindeki adımların çoğu bir bilgisayar tarafından izlenebilmektedir. Ayrıca her adımın bilgisayar tarafından kontrol edilebilmesine rağmen, birçok kritik adım yine de deneyimli bir operatörün kararını ve dikkatini gerektirmektedir. Bu nedenle, operatörlerin tasarımlarından ve büyütme işlemlerinden elde edilen kristallerin özelliklerinde hala önemli farklılıklar bulunabilmektedir.

Şekil 2.2, tipik bir modern CZ büyütme sistemini göstermektedir. Başlıca bileşenler arasında sıcak bölge, kristal çekme / döndürme, pota kaldırma / döndürme mekanizmaları ve ayrıca çap ve sıcaklık algılama cihazları bulunur. Kristal çekme işlemi, vakum altında ve soy gaz ortamında gerçekleştirilmektedir. CZ kristal büyütmesi üç ana süreçten oluşur ve bunlar: (1) daldırma ve boyun oluşturma, (2) omuz ve gövde büyütmesi, (3) son koni büyütmesi / sonlandırması şeklindedir. Boyun büyütme süreci, dislokasyonsuz kristal büyütmenin en kritik aşamalardan biridir; başarılı bir boyun süreci olmadan gövde büyütmesi başlatılamaz [22].



Şekil 2.2. CZ büyütme sistemine ait bir şema

CZ büyütme süreci, bir kuvars veya grafit potada bulunan polikristal külçelerin ve varsa katkı malzemesinin eritilmesi ile başlar. Sıcaklık ayarlamaları ve stabilizasyon, eriyik yüzey sıcaklığının, malzemenin erime sıcaklığına yakın durumda gerçekleştirilir. Çelik bir halatın ucuna bağlanan rehber kristal (8-12 mm çapında) eriyik içine daldırılır. Kristalin eriyik ile teması düzgün bir menüsküs oluşturuyorsa, Dash'ın [23] tekniğine dayanan “boyun” işlemi başlayabilir. Boyun adımı, dislokasyon içermeyen kristal büyütmesinin, yalnızca dislokasyonların sonlandırıldığı bir kristalinden devam etmesinden dolayı gerçekleştirilir. Her ne kadar büyütme işleminde kullanılan rehber kristalleri genellikle dislokasyonsuz olsa da, kristalin eriyiğe teması anında, termal şok nedeniyle dislokasyonlar oluşur. Bu dislokasyonlar, kristalin gövde aşamasına başlamadan önce ortadan kaldırılmalıdır. Boyun, dislokasyonları sonlandırmak için yapılan bir işlemdir. Boyun oluşturma sırasında, kristal çekme hızı ve uygun sıcaklık değerinde, çap azaltılır. Amaç, nispeten hızlı şekilde çekilen kristal çapının yaklaşık 3-4 mm olmasını sağlamaktır. Dislokasyonsuz kristal genellikle birkaç santimetrelük boyun büyütmesi sonunda elde edilir. Elmas yapı kristallerindeki kusurlar, genelde $\langle 111 \rangle$ veya $\langle 100 \rangle$ doğrultusu boyunca çekilmiş kristaller için büyütme eksenine eğimli olan $\{111\}$ düzleminde yayılırlar ve dışarı kayarak kristal yüzeyinde sonlanırlar. Boyun sırasında iki olgu ortaya çıkabilir. Rehber kristalin çapı, boyunun ilk aşamalarında büyük olduğunda, “plastik” sıcaklığın üzerinde ki sıcaklıktan dolayı termal gerilmeler oluşacak ve bu gerilmeler kayma, çapraz kayma ve tırmanma mekanizmalarıyla dislokasyon hareketlerine neden olacaktır. Yüksek hızlı çekmede boyun çapı 3-4 mm iken, gerilmeler göreceli olarak küçülür ve bu da yayılan dislokasyonların yavaşlamasına veya

durmasına neden olur. Dislokasyon hareketleri, büyüyen kristalin sıvı-katı ara yüzeyinden daha yavaş olduğunda, dislokasyonsuz büyüme elde edilir [24].

Dislokasyonsuz büyüme, boyun ile elde edildiğinde, çap, istenen değere ulaşınca kadar “omuz” büyütmesi ile genişletilir. Büyütme sürecinin birçok aşaması, kristal çap değişimlerinin izlendiği ADC altındadır. ADC, uzun süreli çekme oranı değişikliklerine göre küçük sıcaklık ayarlamaları tarafından desteklenir. Kristal eriyikten ayrılırken, minimum temas noktasına sahip duruma getirilir ve bu şekilde ayrılır. Yani çap değeri kademeli olarak azaltılır. Isıtıcı gücü kesildikten sonra, kristal genellikle sistemden çıkarılmadan önce soğuma için bir süre boyunca sistem içinde kalır. Kristalin büyümesi ve soğuması sırasında kristalin toplam bekleme süresi ve sıcaklıkları, kristalin termal tarihini oluşturur.

CZ sisteminde en önemli kısım sıcak bölgedir. Isıtıcı ve ısı kalkanlarının tasarımı, eriyik içindeki radyal ve dikey termal dağılımı belirleyeceği için oldukça önemlidir. Bu termal özellikler, ara yüz şekli ve termal stres oluşumu gibi kristal kalitesini belirleyecek özelliklerle yakından ilişkilidir [25]. Bu kavram büyük çaplı kristal büyütülmesi için daha kritik öneme sahiptir. Ancak kristal büyütme sistemine ait sıcak bölge tasarım faktörleri ve büyütme özellikleri arasındaki ilişki hakkında çok az şey bilinmektedir. Verilen bir büyütme sistemi için, deneysel olarak gözlemlenen uygun büyütme koşulu, genellikle sıcak bölge bileşenlerinin ve büyütme parametrelerinin deneme-yanılma ile değiştirilmesiyle elde edilir. Sıcak bölge tasarımı bir kristal büyütme sisteminden diğerine değiştiğinden dolayı, farklı büyütme sistemlerinde üretilen kristallerin özelliklerinde farklılık göstermesi beklenir. Termal konveksiyon ve zorlanmış konveksiyon koşulları aynı zamanda CZ kristal büyütmesi için önemli kontrol faktörleridir [22].

2.3.1. Dislokasyonsuz büyütme için termal karakteristikler

Büyük çaplı kristallerinin büyütülmesinde, büyütme sistemin termal özellikleri en önemli faktördür. Büyük ölçekli kristallerin yapısal morfolojisi, mükemmelliği ve diğer özellikleri, sıvı-katı ara yüzeydeki ve yakınındaki ısı akış dengesinin doğasıyla belirlenir. Kararlı hal büyümesi sırasında, sıvı-katı ara yüzeyde gerçekleşen bir ısı akışı dengesi vardır. Büyüyen kristaldeki ara yüzey şekli ve yakındaki eş ısı eğrileri; kristalin soğuma koşulları, eriyik radyal sıcaklık dağılımı ve kristalin katılaşma oranı tarafından belirlenir. Kristalin soğuması, kristal yüzeyindeki radyasyon ve gaz akışı ile gerçekleşiyorken, eriyik radyal sıcaklık

dağılımı ise eriyik en boy oranı ve ısıtıcı geometrisine bağlıdır. Kristal çapı küçük olduğunda, kristal tek boyutlu bir iletken olarak düşünülebilir. Yüzey soğutma hızı, en iyi ihtimalle büyüme oranını etkiler. Çap arttıkça, ara yüzey şekli ve kristaldeki eş ısı eğrileri; yüzey soğutma hızına, eriyik radyal sıcaklık dağılımına ve büyüme hızına büyük ölçüde bağımlı hale gelir. Aşırı ara yüzey soğuması, sık bir radyal sıcaklık dağılımı veya yüksek bir büyüme oranı gibi durumlar, yüksek içbükey ara yüzeyine ve yakındaki eş ısı eğrilerine neden olabilir. Bu oluşum, termal gerilmenin kritik çözümlenmiş kesme gerilimini (CRSS) aştığı durumlarda kayma dislokasyonları oluşturabilen yüksek termal stres durumuna tekabül etmektedir. Bu olay genellikle, sıcaklığın plastik bozulma aralığında olan sıvı-katı ara yüzey üstündeki bölgede gerçekleşir. Dislokasyonlar oluşturulduktan sonra, ara yüzeye doğru yayılırlar ve devam eden büyütme dislokasyonsuz olmaz. Çoğunlukla, dislokasyonlar dallanmış bir şekilde çoğalır ve büyüyen kristal sonunda polikristal haline dönüşür. Termal gerilim ile indüklenen mükemmellik kaybı genellikle ciddi derecede içbükey bir ara yüzeyle birlikte oluşur. Büyütme deneyleri, eriyik radyal sıcaklık derecesinin arttırılmasının, ara yüzey eğriliğini ve dolayısıyla termal gerilmeyi azalttığını göstermektedir [22].

Büyük çaplı kristallerin büyümesinde, ana sorun, ara yüzeyde katılaşmanın büyük bir gizli ısı dağıtımı ve kristal büyümesi sırasında ısı yayılımı için daha uzun bir yol nedeniyle oluşan termal gerilmelerdir. Yukarıda tartışılan dislokasyonsuz büyüme için ara yüzeyde ısı dengesini korumak için, kristal çapı arttıkça büyüme oranı azaltılmalıdır. Bu özellikle 300 ve 400 mm çaplı kristal büyümesinin gelişiminde gerekecektir. Sonuçta termal gerilme faktörlerinden dolayı, CZ kristal büyütmesinde çap için pratik bir üst sınır olmuş olacaktır.

2.3.2. Eksenel katkı dağılımı

ADC mekanizmalarını kullanarak büyük boyutlu kristallerinin büyümesinde; kamera çap ölçümlerine bağlı çekme oranı ve sıcaklık değişimlerini içeren eksenel katkı dağılımları normal donma davranışını izler [22].

$$c_s = c_o k_{eff} (1 - g)^{k_{eff} - 1} \quad (2.1)$$

burada c_s , k_{eff} ve g , sırasıyla kristal katkı maddesi konsantrasyonu, katkı ayırma sabiti ve eriyiğin katılaştıran miktarıdır. c_o ise eriyiğin başlangıç katkı yoğunluğudur. Eriyik içinde

tamamen homojen karışım, kuvvetli termal konveksiyon ile gerçekleşir ve katkının ayırma sabiti, çoğu durumda denge değeri (k_0) kabul edilir. Antimoni gibi yüksek buhar basıncına sahip katkı maddelerinin katıldığı yüksek katkılı kristal büyütülmesinde, k değeri denge değerinden önemli ölçüde sapabilir. Katkının ayrışmasından dolayı, bir CZ kristali boyunca katkı yoğunluğunda bir değişim olacaktır. Kristal boyunca değişimin derecesi, katkının k değerine bağlıdır.

k değeri ne kadar küçükse, kristal boyunca katkı yoğunluğundaki değişim o kadar büyük olur. Bundan dolayı katkı maddelerinin ayırma etkisi, üretilen kristallerinin boyutunda sınır oluşturur. Ekstra pota yöntemi [24] ve sürekli büyüme yöntemi [26] gibi standart olmayan CZ yöntemleri, katkı ayırmasına bağlı etkiyi ortadan kaldırmak için kullanılmıştır. Eksenel mikroskopik değişmezlik, mikroskopik büyüme oranı ile kontrol edilir. Termal konveksiyon, termal asimetri ve çekme oranı dalgalanmaları, mikroskopik büyüme dalgalanmalarının kaynağıdır [22].

2.3.3. İstenmeyen safsızlıklar

Pota malzemesinden gelebilecek safsızlıklar veya eriyiğin üstündeki bazı kalıntı buharlaşmalar, kristal büyümesi sırasında eriyiğe ve kristal içine karışabilir. Oksijen ve karbon, CZ kristalinin içine karışabilen başlıca kirliliklerdir. Kuartz pota, silisyum kristal büyütmesinde oksijen kirliliği için ciddi bir kirlilik kaynağıdır. Bunun nedeni, erimiş silikon kuartz pota içinde çözünmeler oluşturur ve potadan açığa çıkan oksijeni soğurur. Normal katkı maddelerinin aksine, silikon eriyiğindeki oksijen dinamik bir sistemdir ve oksijen dağılımı eriyik içinde homojen değildir. Kristale katılan oksijen dağılımı, pota çözünme oranı ve eriyik akışının (oksijen bakımından zengin eriyiğin nasıl taşındığını belirleyen) doğası arasındaki karmaşık etkileşimlerin bir sonucudur. Bu nedenle, bir silikon kristalinin eksenindeki oksijen dağılımı, normal donma davranışının bir sonucu değildir ve dağılım profili, sıcak bölge termal özelliklerine ve kullanılan büyüme parametrelerine bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir [22]. Benzer durum grafit pota kullanımında ise kristal içerisine karbon kirliliği girecektir ve bu safsızlığın elektriksel olarak aktif davranması da kaçınılmazdır. Homojen dağılmayan bu kirlilikler ciddi problemler oluşturabilirler.

Sıvı-katı ara yüzeyinde bir safsızlığın kristale katılması derecesi, ayırma sabiti ile kontrol edilir. Katılma oranı düşük olduğunda veya safsızlık yoğunluğu seyreltildiğinde, ayırma

katsayısı denge değerine çok yakın veya özdeş bir değer alır. CZ kristal büyütmesinde yüksek büyüme oranına sahip katkılı kristalde, katkı katılma davranışının, denge değerinden sapan k değerine neden olduğu bulunmuştur. Örneğin, $k_0 < 1$ durumu için, k değerinin artan büyüme oranları ile arttığı gözlemlenmiştir [30]. Bu davranış, sıvı-katı ara yüzeyinde yoğunluk değişikliğini hızlıca eşitleyemeyen kristal içindeki katkının sınırlı difüzyonuna bağlıdır. Sıvı-katı ara yüzeyde safsızlıkların yoğunluğu eriyik içindeki yoğunluk değerinden daha yüksek olduğu için, kristal içine difüzyon sonucunda daha fazla sayıda safsızlık atomu eklenir. Bu, daha yüksek bir safsızlık oranı ve denge değerinden daha büyük olan etkili bir ayırım katsayısı olan k_{eff} ile sonuçlanır [22].

2.3.4. Kristal ve potanın dönme etkisi

Sabit başlangıç erime geometrisi ve sıcak bölge termal dağılımı için, oksijen dahil edilmesini önemli ölçüde değiştirebilen parametreler, pota ve kristal dönüşleri ve büyüme oranı değişimleridir. Kristal / pota dönüşünün eriyik akış örüntüleri üzerindeki etkisi, geçmişte oda sıcaklığında silikon eriyiği ile benzer viskozitedeki akışkanın kullanıldığı simülasyon ile incelenmiştir [27]. Gerçek kristal büyümesinde ise akış desenleri termal dağılımın varlığı ile önemli ölçüde değiştirilebilir. Simülasyonların sonuçları, dönme parametrelerinin etkisi hakkında çok yararlı bilgiler sağlar. Kakimoto ve arkadaşları [28,29] çeşitli kristal ve pota dönüş hızları için sabit gözlemcilerle x-ışını radyografisi kullanarak CZ büyütmesi sırasında, doğrudan silisyum eriyiğin termal ve zorlanmış taşınım akışlarını gözlemlemiştir. Eksenel olmayan, simetrik sıcaklık dağılımlarının termal dağılım akışları üzerindeki etkisi açıkça görülmüştür. Kristal dönme kaynaklı zorlanmış taşınım ile termal dağılımın bastırılması da kanıtlanmıştır. Büyüyen bir sistemin akış özellikleri hakkında bilgi edinmenin bir yolu, parametrik büyüyen deneyleri takiben büyütülen kristalleri analiz etmektir.

Kristal dönüş hızı, yukarı doğru eriyik akışının büyüklüğünü belirler. Bu akış, pota altından büyütme ara yüzüne istenmeyen safsızlık taşınmasıyla sonuçlanabilir. Genel akış modeli ve safsızlık birleşimi üzerindeki net etki, potanın dönüş hızına ve dönme yönüne bağlıdır [22].

Pota dönüşü, düşey olmayan sıcaklık değişiminden kaynaklanan termal dağılım akışını arttıran radyal basınç dağılımları oluşturur. Bu nedenle, hızlı pota dönüşü, pota materyal kirliliğinin, pota duvarının yakınındaki büyüyen kristale taşınmasına yardımcı olur ve

kristale katılımı artırır. Ayrıca hızlı eriyik akışı, daha ince bir eriyik-pota sınır difüzyon tabakası ile sonuçlanır, bu da pota çözünmesini artıracak bir durumdur [22].

2.4. Dilim Hazırlama

Kristal büyütme işleminden sonraki ilk adım, teknik özelliklere uygun olarak parlatılmış, temiz ve hasarsız yüzeylerin hazırlanmasıdır. Nano boyutlu aygıt üretimi için bu aşamalar kritik öneme sahiptir. Parlatılan dilimlerin gereklilikleri ve bunların her birinde aynı özellikler barındırması zorlu bir süreç gerektirmektedir. Parlatılmış dilimler, bir kristal külçe büyütüldükten sonra şekillendirme, parlatma ve temizleme aşamalarının karmaşık dizisi ile hazırlanır.

Tek kristal külçe ilk olarak kristal mükemmelliği ve öz direnç açısından, hassas bir çapta silindirik bir yüzey şekline sahip olmadan önce sınıflandırma ve değerlendirme yapılır. Kristal yönelimlerini belirten bir çentik ile kristal eksenine paralel olarak külçe yüzeyi öğütülür. Birincil düz çentik, dilimlemede ve otomatik işleme ekipmanı ile aygıt işleminde hızlanması için kullanılır. Birincil çentik aynı zamanda yonga düzeni için bir yönlendirme referansı olarak da işlev görür. Dilim üzerinde ilkinden daha kısa olan ikinci bir düz çentik ile her iki çentik dilimin yüzey yönelimi ve iletkenlik tipini tanımlamak için kullanılır [22].

2.4.1. Dilimleme

Dilimleme işlemi, üretilen külçeden istenilen kalınlıkta dilimleri üretir. Dilimleme, kalınlık, koniklik, eğrilik gibi bir dilimin önemli mekanik yönlerini belirler. Dilimleme, daha önce x-ışını kırınımı ile belirlenen doğru kristal yönelime göre, küçük çaplı dairesel dilimleme teli ile yapılır. Dilimleme teli, paslanmaz çelik tel üzerinde elmas parçacıkları içeren ince bir teldir. Son zamanlarda kristal dilimlemede çok telli dilimlemenin geliştirilmesi, önemli ölçüde azalan eğim ile yüksek verimli ve üstün mekanik özelliklere sahip dilimler elde edilmesini sağlamıştır. Çok telli dilimleme, iki kasnak boyunca uzanan paralel, eşit aralıklı ve düzgün gerilmiş paslanmaz çelik tel dizisinden oluşur. Bu tel dizisi aslında karmaşık bir kasnak dizisi boyunca sarılmış tek bir paslanmaz çelik telin parçasıdır. Külçenin çoklu dilimlere ayrılması sırasında hareket eden tellerin ısınmaması ve hareket kolaylığı sağlanması için bir solüsyon kullanılır. Çok telli dilimlemenin kesme hızı, sıradan dilimleme sistemine göre çok daha yavaş olmasına rağmen aynı anda 300 dilim üretilmektedir.

Daha yüksek verimin yanı sıra, çoklu tel dilimlemenin, başka avantajları da vardır. Ayrıca, hareketli telin yavaş açılı hareketleri, külçe başına daha fazla dilim veren küçük çentik kaybıyla sonuçlanır. Dilimleme esnasında çentik boyutu kaybının, kullanılan telin çapına çok yakın olduğu bilinmektedir. Çok telli dilimleme, malzeme tasarrufu, daha fazla üretkenlik ve geliştirilmiş dilim mekanik özellikleri sağlamaktadır. 200 ve 300 mm çapında külçeleri dilimlemek için kullanılmış olup, gelecekte ulaşılacak çap değerleri için de kullanılması beklenmektedir.

2.4.2. Kimyasal aşındırma

Dilimlerin kimyasal aşındırma işlemi, önceki şekillendirme basamakları olan silindirik külçe yüzey öğütme ve dilimleme sırasında oluşan mekanik hasarı gidermek için yapılır. Aşındırma, asidik bir çözelti veya bir yakıcı etkiye sahip bir kimyasal ile gerçekleştirilebilir. Külçe malzemesine bağlı olarak çeşitli kimyasallar kullanılabilir. Örneğin, silisyum için asidik olarak çoğunlukla HNO_3 -HF kimyasalları kullanılmaktadır. Yüzey materyali çıkarılması iki aşamalı reaksiyonların sonucudur. Si yüzeyi ilk olarak SiO_2 oluşturmak için HNO_3 ile oksitlenir, ardından HF ile oksit tabaka uzaklaştırılır. Asitle aşındırma pürüzsüz ve parlak bir yüzey üretir. Bununla birlikte, reaksiyon ekzotermik olduğundan, homojen aşınmayı sağlamak için sıcaklık kontrolü önemlidir. Yakıcı aşındırma için, belirli stabilizatörler ile KOH gibi bir alkali solüsyon [22] kullanılır. KOH aşındırma tekdüze bir aşındırma oranı sunar, fakat KOH aşındırma oranı kristal yönelimine bağlı olduğundan asit ile gerçekleşen aşındırmadan daha pürüzlü bir yüzey üretebilir. Dilimin kimyasal aşınması, mekanik hasarı gidermek için kenar yuvarlama ve yüzey taşıma gibi müteakip mekanik işlemlerden sonra tekrarlanabilir.

2.4.3. Kenar yuvarlama

Hazırlanan dilimlerin köşeli kenarları bir kenar öğütücü ile yuvarlanır. Yuvarlak kenarlı dilimler, kenar çentik ve çatlaklarının neden olduğu mekanik kusurları büyük ölçüde azaltır. Kenar çentik ve çatlakları, dilimin kırılmasını veya plastik deformasyonun başlamasını ve termal işlem sırasında dislokasyonların oluşmasını kolaylaştıran etkenlerdir. Ek olarak, yuvarlak kenar, epitaksiyel biriktirme işleminde epitaksiyel kronun (dilim kenarındaki daha kalın epitaksiyel tabaka) oluşmasını ve dilim kenarındaki fotorezistin yığılmasını ortadan kaldırır. Yuvarlatılmış kenarın şekli genellikle, kenar profilinin bir endüstriyel standart

şablonuna (SEMI standartı) uygundur. Bununla birlikte, bu standarta uymayan varyasyonlar da mevcuttur. Bazı uygulamalarda yuvarlak kenar, dielektrik seviye düzleştirme için kimyasal-mekanik parlatma (CMP) işlemini kolaylaştırmak amacıyla, keskin olmayacak şekilde değiştirilmiştir. Bu durumda keskin olmayan kenarın, cilalama sırasında, kalıbın şablondan dışarı kaymasını önlediği varsayılmaktadır. Diğer uygulamalar, daha fazla dayanıklılık için daha fazla yuvarlatılmış kenar şekli de gerektirebilir [22].

2.4.4. Yüzey taşlama

Kristal dilim yüzeyinin taşlanması, genellikle bir çözelti içinde süspansiyon halinde tutulan mikron boyutlu alümina-silikon karbür parçacıklarının bir karışımının varlığında, ters yönde dönen iki dökme demir plaka arasında öğütülme işlemidir. Taşlama işleminin amacı, dilimlemeden kalan düzensiz hasarın giderilmesi ve iki yüzey arasında yüksek derecede paralellik ve düzlük elde etmektir. Aslında, taşlama sonrası dilimler, tüm şekillendirme işlemi akışında ki en iyi mekanik özelliklere sahiptir. Sonraki parlatma işlemi, genellikle taşlama işlemi ile elde edilen düz yapıyı bozar. Elmas parçacıkları bulunan hassas öğütücü, dilimin her iki yüzeyinde azaltılmış yüzey hasarı elde etmek için kullanılır. Azaltılmış yüzey hasarı ile tekrardan kimyasal aşındırmaya olan ihtiyaç azalır ve iyi mekanik özellikler korunabilir [22].

2.4.5. Parlatma

Parlatma işlemi, bir parlatma keçesi ve solüsyon içeren kimyasal-mekanik bir yüzey mükemmelleştirme işlemidir. Parlatma solüsyonu, genellikle, mikron-nano boyutlu silika parçacıkları içeren bir alkali kolloidal solüsyondur. Kimyasal-mekanik parlatma (CMP), yüzeydeki hasarı gidermek ve ayna benzeri bir yüzey elde etmek için kullanılırken, aynı zamanda taşlama ile elde edilen dilim yüzey düzlüğünü de bozabilir. Bu nedenle, düzlük bozulmasını en aza indirmek için parlatma süresini ve işlem parametrelerini optimize etmek önemlidir. Çift taraflı parlatma (aynı anda hem ön hem de arka yüzeylerde CMP), tek taraflı cilalama düzenlemelerinden daha üstün düzlüğe neden olduğu bulunmuştur. Eş zamanlı çift yüzey taşlama ve çift taraflı CMP birleşimi, daha üstün bir toplam kalınlık değişimi ve yüzeysel düzlük ile sonuçlanmıştır. Böyle bir yaklaşım, büyük çaplı dilimler (R300 mm) için standart bir üretim işlemi haline gelmektedir.

Yüzey hazırlamada daha fazla iyi kalite, bölgesel topografiyi tamamlama ve daha hassas yüzey elde etmek için, plazma destekli kimyasal aşındırma (PACE) gibi araçlar geliştirilmiştir. Bu sistem, dilim yüzeyinin arzu edilen şekilde kontrol edilmesini sağlamak için bir tarama mekanizmasına sahiptir ve uzamsal olarak sınırlı bir plazma kullanır. PACE, reaktif iyon aşındırmada yer alan enerjik iyonlardan ziyade, düşük enerjili iyonları (yaklaşık 1 eV) kullanır. Bu nedenle, neredeyse hiç yüzey hasarı oluşturmada PACE kullanılabilir [22].

2.4.6. Temizleme

Hazırlanan dilim üzerindeki yüzey kirliliği elektronik cihaz performansını etkileyebilir. Kirleticiler dilim yüzeyine fiziksel veya kimyasal olarak bağlanabilir. Dilim şekillendirme işlemleri sırasında ve aynı zamanda fabrikasyon işlemlerinde birçok adımda dilimlerin temizlenmesi gerekir. Hazırlanan dilim, aygıt fabrikasyonu veya diğer kaplama işlemlerine gönderilmeden önce kirlilikten arındırılmış olmalıdır. Dilim şekillendirme ve parlatma işlemleri sırasında yüzey kirleticilerin giderilmesi için temizleme işlemi aşağıda tartışılmıştır.

Genel olarak kirleticiler; moleküler, iyonik veya atomik olarak sınıflandırılabilir. Tipik moleküler kirleticiler arasında, parlatma ve kesme işlemlerinde kullanılan yapışkanlar, reçineler, yağlar ve dilim taşıma-depolama da kullanılan plastik kaplardan gelebilecek kirlilikler bulunmaktadır. Moleküler kirleticiler, zayıf elektrostatik kuvvetler tarafından dilim yüzeyinde emilir. Dilim, kimyasal reaksiyonları içeren bir sonraki temizlik aşamasından önce bunlardan arındırılmalıdır. Na^+ , Cl^- ve F^- gibi iyonik kirleticiler, HF içeren veya yakıcı çözeltilerdeki dilim işlemlerinden sonra oluşmaktadır. Kimyasal soğurma ile dilim yüzeyine bağlanırlar. Bu atomik kirleticiler Fe, Ni ve Cu gibi geçiş metali atomlarına bağlıdır. Geçiş metalleri ve iyonik türler ise cihaz performansında bozulmaya neden olabilir.

Kimyasal temizleme, dilim yüzeyindeki kirleticilerden giderilmesinde etkili bir yöntemdir. Birçok kimyasal temizlik süreci geliştirilmiştir. Yarı iletken endüstrisinde yaygın olarak kullanılan işlem, H_2O - H_2O_2 - HN_4OH (Standart temizlik 1, SC1) ve H_2O - H_2O_2 - HCl (Standart temizlik 2, SC2) içeren iki ardışık temizleme solüsyonunun oluşturduğu ve “RCA Temizliği” [30] adı verilen işlemdir. SC1 temizliği, karışım oranları 5: 1: 1 olacak şekilde,

organik kirletici maddelerin NH_4OH 'nin çözücü etkisi ve H_2O_2 'nin güçlü oksitleyici etkisi ile giderilmesi işlemidir. SC2 temizliği, 6: 1: 1'lik tipik karışım oranlarına sahip, dilim yüzeyinden geçiş ve alkali metalleri uzaklaştırır. SC1, parçacıkları dilim yüzeyinden ayıran NH_4OH 'nin aşındırma etkisi ile dilim yüzeyine fiziksel olarak bağlı parçacıkları da kaldırabilir. NH_4^+ ve OH^- elektrolitleri, dilim yüzeyine ve ayrılan parçacığa aktarılan karşı yüklerin itme etkisi sayesinde, parçacıkların dilim yüzeyinde yeniden birikmesini önler. RCA temizliğin değiştirilmiş versiyonu, SC1 işleminden dolayı silikon yüzeyinde oluşan ince oksit tabakasını ortadan kaldırmak için seyreltilmiş HF çözeltisi ile kısa bir aşındırma işlemi şeklindedir. SC1'den kaynaklanan ince oksidin, SC2'nin temizleme işlemini engellediği düşünüldüğünden dolayı bu geliştirilmiştir. RCA temizliğin yayınlanan ve yayınlanmayan birçok değişik türü vardır. Değişikliklerin çoğu karışım oranlarındadır. Örneğin, silikon yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için, SC1'deki NH_4OH 'nin karışımdaki oranını, orijinal değerden büyük ölçüde azaltılması ile oluşmaktadır. Ayrıca piranah ($\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$), ozonlu su gibi diğer kimyasal temizlik işlemlerinin de etkili olduğu bilinen bir gerçektir. Ancak, RCA temizliği ve geliştirilen çeşitleri, yarı iletken silikon üreticileri tarafından en çok tercih edilen temizlik süreçleri olmuştur [22].

2.5. Temel Kavramlar ve EMI Kalkanlama

Günümüzde elektrik-elektronik sistemler için EMI ve EMC gibi kavramları daha sık duyduğumuz bir gerçektir. Giderek yaygınlaşan elektrik-elektronik ürünler, kablosuz iletişim sistemleri, radarlar gibi elektromanyetik kaynak sayısının artması EMI problemini ve uyulması gereken EMC yönetmeliklerini karşımıza çıkarmıştır. Aşağıda gürültü, duyarlılık, emisyon, EMI ve EMC gibi bazı temel kavramlardan bahsedilecektir.

Gürültü, istenen işaretin-sinyalin dışında bir devrede mevcut olan herhangi bir elektrik – optik sinyalidir. Bu tanım, doğrusal olmayan nedenlerden dolayı devrede üretilen bozulma ürünlerini kapsamamaktadır. Bu bozulma ürünleri istenmeyen de olsa, bunlar devrenin başka bir parçasına bağlanmadıkça gürültü olarak kabul edilmezler. Bir devrenin bir bölümünde istenen bir sinyalin, devrenin başka bir kısmına bağlandığında gürültü olduğu düşünülebilir.

Gürültü kaynakları, aşağıdaki üç kategoriye ayrılabilir. İlk olarak fiziksel sistemlerdeki, termik ve atış gürültüsü gibi rastgele dalgalanmalardan kaynaklanan iç kaynaklı gürültü kaynaklarıdır. İkinci tür kaynaklar ise motorlar, anahtarlar, bilgisayarlar, dijital

elektronikler, radyo ve radar vericileri gibi insan yapımı gürültü kaynakları vardır. Son olarak yıldırım ve güneş patlamaları gibi doğal rahatsızlıkların neden olduğu üçüncü bir çeşit gürültü mevcuttur.

EMI, gürültünün istenmeyen etkisidir. Bir gürültü voltajı bir devrenin hatalı çalışmasına neden oluyorsa, bu bir girişimdir. Gürültü tamamen ortadan kaldırılamaz. Gürültü, yalnızca girişime neden olmayacak büyüklüğe kadar azaltılabilir.

EMC, bir elektronik sistemin çalışması amaçlanan elektromanyetik ortamda performans kaybı olmadan düzgün bir şekilde çalışması ve ayrıca bulunduğu ortama elektromanyetik kirlilik kaynağı olarak davranmamasıdır. Bu tanımdan EMC' nin, emisyon ve duyarlılık şeklinde iki türü olduğu anlaşılmaktadır.

Duyarlılık, bir cihazın veya devrenin istenmeyen elektromanyetik enerjiye (yani, gürültüye) yanıt verme kabiliyetidir. Bu yanıt sistem performansında bozulma veya tamamen devre dışı kalması olarak gözlenecektir. Duyarlılığın zıttı bağışıklıktır. Bir devrenin veya cihazın bağışıklık seviyesi, ekipmanın performans kaybına uğramadan ve tanımlanmış bir güvenlik payı ile çalışabildiği elektromanyetik ortamdır. Performans kaybını neyin oluşturduğunu tanımlamak ve bağışıklık (ya da duyarlılık) seviyelerini belirlemek zorlu bir iştir.

Emisyon, bir ürünün bulunduğu ortamda diğer ürünler üzerinde girişime neden olma potansiyeli ile ilgilidir. Emisyonları kontrol etmenin amacı, yayılan elektromanyetik enerjiyi sınırlamak ve böylece diğer ürünlerin çalışması gereken elektromanyetik ortamı sağlamaktır. Emisyon oluşturan bir ürünün kontrol edilmesi, ortamdaki diğer birçok ürün için girişim sorununu ortadan kaldırabilir. Bu nedenle, elektromanyetik açıdan uyumlu bir ortam üretmek için emisyonun kontrol edilmesinde ciddi anlamda yarar vardır.

Duyarlılık, bir dereceye kadar kendi kendini düzenler. Ancak emisyon, kendi kendini düzenleme eğiliminde değildir. Ayrıca emisyon kaynağı olan bir ürün, o emisyonun etkilenemeyebilir. EMC' nin tüm elektrik-elektronik ürünlerin tasarım aşamasında dikkate alınması için, devlet veya çeşitli düzenleyici kurumlar tarafından, yerine getirilmesi gereken düzenlemeler ile zorunlu hale gelmiştir. Bu düzenlemeler izin verilen emisyonları kontrol eder ve bazı durumlarda gerekli olan bağışıklık derecesini tanımlar [14,32].

EMC mühendisliği iki yoldan biriyle ele alınabilir: Biri kriz yaklaşımı, diğeri sistem yaklaşımıdır. Kriz yaklaşımı, tasarımcı tarafından işlevsel ürün bitene kadar EMC' nin tamamen ihmal edilerek üretilmesi ve test ya da sahada kullanımı sırasında bir sorunun meydana çıkması ile gelişen süreçtir. Bu geç aşamada uygulanan çözümler genellikle pahalıdır ve istenmeyen eklentilerden oluşur. Ekipman geliştirme tasarımdan test aşamasına kadar ilerledikçe, tasarımcı için mevcut olan çeşitli gürültü azaltma teknikleri sürekli olarak azalır. Eşzamanlı olarak maliyet artar. Bu nedenle girişim problemlerine erken çözümler uygulanması, genellikle en az maliyete ve en iyi çözüme kavuşturur [14].

Sistem yaklaşımı, EMC' yi tasarım boyunca ele alır; tasarımcı, tasarım sürecinin başında EMC problemlerini önceden tahmin etmesi, devre tahtasındaki ve prototipin ilk aşamalarında oluşabilecek sorunları bulması ve EMC için son prototipleri olabildiğince test etmesidir. Bu şekilde EMC, elektrik, mekanik ve bazı durumlarda ürünün yazılım bölümlerinde tasarımın ayrılmaz bir parçası haline gelir. Bu yaklaşım sonucunda ürün, ek malzeme ve masraftan uzak bir şekilde, tasarım aşamasında EMC' ye sahiptir.

EMC ihmal edilerek tasarlanmış bir ürün, EMC testi sırasında neredeyse her aşamada sorunlara yol açacaktır. Test analizinde, muhtemel birçok gürültü yolu olasılığından hangisinin sorun oluşturduğunu anlamakta kolay olmayabilir. Bu son aşamadaki çözümler genellikle devrenin ayrılmaz parçalarından başka ekstra bileşenlerin eklenmesini gerektirir. Ödenen cezalar, eklenen mühendislik ve test masraflarının yanı sıra, gürültü azaltma bileşenlerinin ve bunların kurulumu da ilave maliyete neden olacaktır. Ayrıca boyut, ağırlık ve güç kaybı gibi problemlerin de olma ihtimali yüksektir [14].

2.5.1. Kalkanlama

Bir kalkan, duyarlı ürünün bulunduğu bölge ile emisyon yapan ürün bölgesi arasında yer alan genellikle metalik bir bölümdür. Elektromanyetik alanların bir bölgeden diğerine yayılmasını kontrol etmek için kullanılır. Kalkanın gürültü kaynağını çevrelemesi, yani emisyon kaynağını engellemek, elektromanyetik uyumlu bir ortam sağlayacaktır. Bu işlem kalkanın dışında bulunan tüm hassas ekipmanlara koruma sağlar. Ayrıca, elektromanyetik radyasyonu bir bölgeden uzak tutmak için bir kalkan da kullanılabilir. Bu teknik, yalnızca kalkanın gerisinde bulunan spesifik ekipman için koruma sağlar. Genel bir sistem açısından, gürültü kaynağını engellemek, duyarlılığı bulunan sistemi korumaktan daha verimlidir.

Bununla birlikte, bazı durumlarda, kaynağın yayılmasına izin verilmelidir (baz istasyonları, radarlar vb.). Bu durumda bireysel alıcıların korunması gerekli olabilir.

Ne kadar iyi tasarlanırsa tasarlansın, tam anlamıyla yalıtılmış bir ortam oluşturmak alternatif sızıntılardan dolayı pek mümkün değildir. Sinyal kabloları ve güç bağlantılarının, kalkansız bölgeden kalkanlanmış bölgeye iletim yolu ile oluşturacağı etkilerde hesaba katılmalıdır. Yalıtılmış ortam için ayrıntılı bir şekilde oluşabilecek veya taşınabilecek girişim kaynakları bertaraf edilmelidir [14].

2.5.2. Yakın alan-uzak alan kavramları

Bir alanın özellikleri, kaynak (anten), kaynağı çevreleyen ortam ve kaynak ile gözlem noktası arasındaki mesafe ile belirlenir. Kaynağa yakın bir noktada alan türü, esas olarak kaynak özelliklerine göre belirlenir.

Kaynağın uzaklığı, EM alanın özellikleri esas olarak yayıldığı ortama bağlıdır. Bu nedenle, bir radyasyon kaynağını çevreleyen boşluk iki bölgeye ayrılabilir. Matematiksel olarak $\lambda/2\pi$ değerine göre yakın veya uzak alan etkileşimi belirlenir. $\lambda/2\pi$ değerinden büyük mesafeler için uzak veya radyasyon alanı etkilidir. Yani ışına yoluyla girişim oluşmaktadır. $\lambda / 2\pi$ civarındaki bölge, yakın ve uzak alanlar arasındaki geçiş bölgesidir. Kaynağa yakın olan bölge, yani $\lambda/2\pi$ değerinden küçük mesafeler yakın alandır. Diğer bir değişle indüksiyon alanı olarak tanımlanmaktadır [14].

Elektrik alanın (E) manyetik alana (H) oranı dalga empedansıdır. Uzak alanda, bu oran ortamın karakteristik empedansına eşittir (örneğin hava veya boş alan için $E / H = Z_0 = 377 \Omega$). Yakın alanda, oran, kaynağın özelliklerine ve alanın gözlemlendiği kaynağa olan uzaklığa göre belirlenir.

Kaynak yüksek akım ve düşük voltajlıysa ($E / H < 377$), yakın alan baskın olarak manyetik alandır. Tersine, eğer kaynak düşük akım ve yüksek gerilime sahipse ($E / H > 377$), yakın alan baskın olarak elektrik alandır.

Bir çubuk veya düz kablo anteni için kaynak empedansı yüksektir. Antenin yakınındaki dalga empedansı (ağırlıklı olarak bir elektrik alanı) da yüksektir. Mesafe arttıkça, elektrik alan tamamlayıcı bir manyetik alan oluşturmasından dolayı yoğunluğunun bir kısmını

kaybeder. Yakın alanda, elektrik alan $(1 / r)^3$ oranında azalır, oysa manyetik alan $(1 / r)^2$ oranında azalır. Böylece, düz bir tel antenden gelen dalga empedansı, mesafe ile azalır ve uzak alandaki boş alan empedansına asimptotik olarak yaklaşır.

Ağırlıklı olarak manyetik alan için (örneğin bir döngü anteni tarafından üretilen) antenin yakınındaki dalga empedansı düşüktür. Kaynağın uzaklığı arttıkça, manyetik alan $(1 / r)^3$ oranında zayıflar ve elektrik alanı $(1 / r)^2$ oranında zayıflatır. Bu nedenle dalga empedansı mesafe ile artar ve $\lambda / 2\pi$ lik bir mesafede serbest alanın değerine yaklaşır. Uzak alanda, hem elektrik hem de manyetik alanlar $1 / r$ oranında azalır.

Yakın alanda elektrik ve manyetik alanlar ayrı olarak düşünülmelidir, çünkü ikisinin oranı sabit değildir. Ancak, uzak alanda, 377Ω empedansa sahip bir düzlem dalgası oluşturmak için birleşirler. Bu nedenle, düzlem dalgaları tartışıldığında, uzak alanda olduğu varsayılır. Bireysel elektrik ve manyetik alanlar tartışıldığında, bunların yakın alanda olduğu varsayılır [14].

2.5.3. Elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama

Kalkanlama etkinliği birçok farklı yoldan analiz edilebilir. Bu bölümde, S.A. Schelkunoff tarafından geliştirilen yaklaşım anlatılacaktır. Schelkunoff' un yaklaşımı, kalkanlamayı hem soğurma hem de yansıma bileşenleriyle, bir iletim hattı sorunu olarak ele almaktır. Soğurma, kalkanın içinde oluşur ve kalkanın ısınmasıyla sonuçlanır. Yansıma, gelen dalga empedansı ile kalkan empedansı arasındaki farkının sonucudur [14].

Kalkanlama, kalkan malzemesinin neden olduğu manyetik veya elektrik alan büyüklüklerindeki azalma açısından belirlenebilir. Bu kalkanlama etkinliğinin desibel (dB) cinsinden ifade edilmesi uygundur. Desibel kullanımı, daha sonra, toplam kalkanlamanın elde edilmesi için çeşitli etkilerle oluşan kalkanlama ifadesinin kullanılmasına izin verir. Kalkanlama etkinliği (SE), elektrik ve manyetik alanlar için aşağıdaki gibi tanımlanmıştır; [14, 31].

$$SE = 20 \log \left(\frac{E_0}{E_1} \right) \text{ dB} \quad (2.2)$$

ve manyetik alan için;

$$SE = 20 \log \left(\frac{H_0}{H_1} \right) \text{ dB} \quad (2.3)$$

şeklindedir. Burada, E_0 ve H_0 gelen alan gücüdür, E_1 ve H_1 ise iletilen dalganın alan gücüdür. Kalkanlanmış bir ortamın tasarımında iki temel husus vardır: (1) kalkan malzemesi için kalkanlama etkinliği ve (2) kalkan üzerinde süreksizlik ve açıklıklardan kaynaklanan kalkanlama etkinliği şeklindedir.

Öncelikle, sürekli olan katı bir kalkanın koruyucu etkinliği belirlenir ve daha sonra süreksizliklerin ve açıklıkların etkisi dikkate alınır. Yüksek frekanslarda, bir kalkanın genel koruyucu etkililiğini belirleyen, kalkan malzemenin tarafından oluşan kalkanlama etkinliği değil açıklıkların kalkanlama etkisidir.

Kalkanlama etkinliği; frekans, kalkan geometrisi, kalkanlamanın ölçüldüğü alan içindeki kalkan konumu, ölçülecek alanın türü, alanın gelme açısı ve polarizasyon ile değişir. Burada düzlemsel iletken malzemelerin kalkanlama etkinliğine odaklanacağız. Bu düzlemsel geometri, genel kalkanlama kavramlarını tanımayı ve kalkan özelliklerin hangi malzeme özelliklerine göre değiştiğini gösterecektir. Düzlemsel levhalar için EMI kalkanlama hesaplarının sonuçları, çeşitli malzemelerin kalkanlama etkinliğini göreceli olarak tahmin etmek için faydalıdır.

Metalik bir yüzeye çarpan bir elektromanyetik dalga iki tür kayıp ile karşılaşılır. Dalga kısmen metalik yüzeyden yansır ve dalganın metalik yüzeyden içeri giren (yansımayan) kısmı, kalkanın içinden geçerken zayıflar. Soğurma kaybı olarak adlandırılan bu ikinci etki, yakın ya da uzak alanda ve elektrik ya da manyetik alanlarda aynıdır. Ancak yansıma kaybı, alanın türüne ve dalga empedansına bağlıdır [14].

Herhangi bir açıklığı olmayan (sürekli) katı bir malzemenin toplam kalkanlama etkinliği, soğurma kaybı (A), yansıma kaybı (R) ve ince kalkanlardaki çoklu yansımaları hesaba katan bir düzeltme faktörünün (B) toplamına eşittir. Bu sayede toplam kalkanlama etkinliği;

$$SE = A + R + B \text{ (dB)} \quad (2.4)$$

şeklinde yazılabilir.

Denklemdaki tüm terimler desibel (dB) cinsinden ifade edilmelidir. Metalik malzemeler için çoklu yansıma faktörü, soğurma kaybı 9 dB' den büyük olması durumunda ihmal edilebilir. Pratik bir bakış açısından B, elektrik alan ve düzlem dalgalar için de ihmal edilebilir [14].

Soğurma Kaybı

Elektromanyetik dalga bir ortamdan geçtiğinde üstel olarak azalacaktır. Bu azalma, kalkan içinde indüklenen akımlar, ohmik kayıplar ve malzemenin ısınması nedeniyle oluşur. Bu yüzden:

$$E_1 = E_0 e^{-\frac{t}{\delta}} \quad (2.5)$$

ve

$$H_1 = H_0 e^{-\frac{t}{\delta}} \quad (2.6)$$

yazılabilir. Burada E_1 ve H_1 , kalkan malzemesi içinde bir t mesafesindeki dalga yoğunluğudur. Dalganın reel değerinin $1/e$ değerine veya %37' sine indirgenmesi için gereken mesafe, tabaka derinliği (δ) olarak tanımlanır ve;

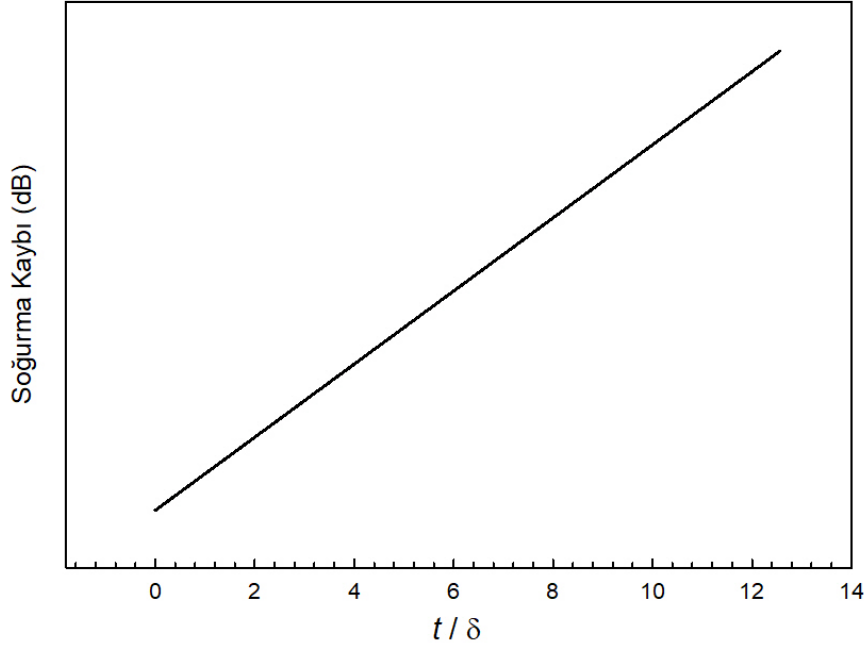
$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_r \sigma_r}} \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilir [11,14,31]. Burada μ_r ve σ_r , kalkan malzemenin göreceli manyetik geçirgenliği ve göreceli iletkenliğidir.

Bir kalkanın içinde meydana gelecek soğurma kaybı ifadesi ise şöyle yazılabilir [11,14]:

$$A = 20 \log e^{\frac{t}{\delta}} = 20 \left(\frac{t}{\delta}\right) \log e = 8.69 \left(\frac{t}{\delta}\right) \text{ dB} \quad (2.8)$$

Bu ifadeden t/δ oranının soğurma kaybına karşı grafiği çizildiğinde, Şekil 2.3 'deki gibi eğimi 8.69 olan bir doğru elde edilecektir.



Şekil 2.3. t/δ oranının soğurma kaybına göre değişimi

Eş. 2.7 ile verilen soğurma kaybı ifadesinden görülebileceği gibi, bir tabaka derinliği kalınlığına sahip kalkanın soğurma kaybı yaklaşık 9 dB' dir. Kalkan kalınlığını iki katına çıkarmak kaybı dB olarak ikiye katlamaktadır.

Şekil 2.3, dB cinsinden soğurma kaybının t/δ oranına göre bir grafiğidir. Bu eğri düzlem dalga, elektrik alan veya manyetik alan için uygulanabilir.

Ayrıca soğurma kaybı frekansa göre de ciddi bir değişiklik göstermektedir. Aynı malzemenin farklı frekanslarda sergileyeceği soğurma kaybı farklı olacaktır. Düşük frekanslarda çok az miktarlarda gerçekleşen soğurma kaybı frekansın artmasıyla birlikte artacaktır. Örnek verecek olursak; $5 \Omega \cdot \text{cm}$ ' lik ve 0.5 cm kalınlıklı Ge pencere için 300 MHz de soğurma ile EM dalga zayıflama miktarı yaklaşık 6.6 dB' dir. Ancak aynı pencerenin 10 GHz de ki soğurma kaybı ile oluşacak azalma yaklaşık 38.6 dB' dir. Yani yarıiletken pencerelerde yüksek frekansta daha yüksek soğurma olur. Çünkü soğurma katsayısı frekansın kareköküyle orantılıdır.

Yansıma kaybı

Yansıma kaybı farklı iki ortam arasındaki karakteristik empedanstan kaynaklanmaktadır. Empedans farkının artmasıyla birlikte yansıma kaybında artış olacaktır. Ayrıca bir kalkan malzemesi için düşünüldüğünde kalkan ortamına giren ve çıkan elektromanyetik dalganın empedans farkıyla karşılaşacağı da bilinmektedir. Empedans farkı ile elektrik ve manyetik alan değerindeki değişim;

$$E_t = \frac{4Z_w}{Z_s} E_0 \quad (2.8)$$

ve

$$H_t = \frac{4Z_w}{Z_s} H_0 \quad (2.8)$$

şeklinde gerçekleşecektir. Burada E_t ve H_t kalkandan geçen elektrik ve manyetik alan, Z_w ortamdaki dalga empedansı ve Z_s kalkanın empedansıdır. Bu ifadeler, çoklu iç yansımalar ihmal edildiğinde, alan büyüklük değişimi cinsinden genel kalkanlama ifadesinde yerine yazılırsa;

$$R = 20 \log \left(\frac{E_0}{E_t} \right) = 20 \log \left(\frac{Z_w}{4Z_s} \right) \text{ dB} \quad (2.10)$$

elde edilecektir.

Bu ifade düzlem dalgalar (uzak alan) için düşünüldüğünde, Z_w değeri boşluğun empedansına (377Ω) eşit olacaktır. Bu durumda yansıma kaybı;

$$R = 20 \log \left(\frac{94.25}{Z_s} \right) \text{ dB} \quad (2.11)$$

olacaktır. İfadeden görüleceği üzere daha düşük kalkan empedansı daha büyük yansıma kaybı demektir [14].

Ayrıca elektriksel yüzey direnci cinsinden;

$$R = 20 \log \left(1 + \frac{\eta_0}{2R_s} \right) \quad (2.12)$$

sekinde ifade edilmektedir [31].

Çoklu yansıma kaybı

Kalkan malzemesi ince olması durumunda, ikinci sınırdan yansıyan dalga ilk sınırdan tekrar yansıyacak ve tekrar ikinci sınıra dönecektir. Bu, kalın bir kalkan durumunda ihmal edilebilir, çünkü soğurma kaybı yüksektir. Dalga ikinci kez, ikinci sınırlara ulaştığında, ihmal edilebilir genliktedir, çünkü o zamandan itibaren kalkan malzemesi kalınlığından üç kez geçmiştir.

Elektrik alanları için, $Z_s \ll Z_w$ durumunda gelen dalganın çoğu ilk sınırdan yansıtılır ve sadece küçük bir yüzdesi kalkan içerisine girer. Bu nedenle, elektrik alanlar için kalkan içindeki çoklu yansımalar ihmal edilebilir.

Manyetik alanlar için, $Z_s \ll Z_w$ durumunda gelen dalganın çoğu ilk sınırdan kalkanın içine girer. İletilen dalganın büyüklüğü, gerçekte gelen dalganın iki katıdır. Bu büyüklükteki bir manyetik alanın çoklu yansımalarının, kalkan içindeki etkisi dikkate alınmalıdır.

Kalkan kalınlığı (t) ve tabaka derinliği (δ) manyetik alanların çoklu yansıması için düzeltme faktörüdür.

$$B = 20 \log (1 - e^{-2t/\delta}) \quad \text{dB} \quad (2.13)$$

Düzeltilme faktörünün negatif bir sayı olması, çoklu yansımaların bir sonucu olarak, ince bir kalkandan daha az kalkanlama elde edildiğini gösterir [14].

2.6. Materyaller İçin EMI Kalkanlama Etkinliği Ölçüm Teknikleri

Sivil ya da askeri uygulamalarda elektromanyetik girişimi engellemek için farklı özellikte malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler için kalkanlama etkinliğini belirlenmesi ürün

tasarım aşamasında ciddi öneme sahiptir. Malzemeler için kalkanlama etkinliğinin belirlenmesinde birçok yöntem vardır. Bu yöntemler genellikle frekans aralığına, analiz edilecek malzemenin fiziksel özelliklerine (kalınlık, boyut, iletkenlik), malzemenin kullanım alanına (elektronik, elektro-optik) göre çeşitlilik göstermektedir. Bu ölçüm yöntemlerinden bazılarını aşağıda belirtilmiştir.

2.6.1. Eş eksenli TEM hücreleri

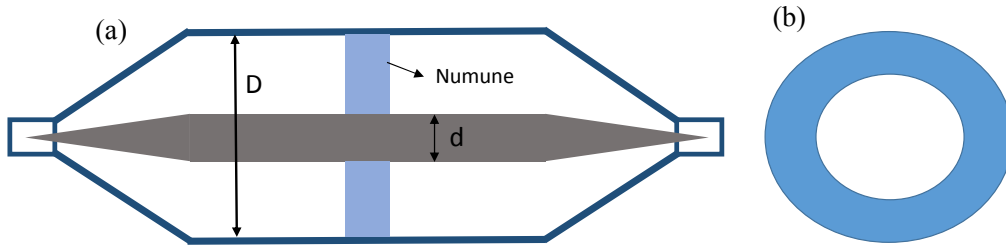
TEM (enine elektromanyetik) hücresi, uçları sivriltilmesiyle, eş eksenli hat bağlantısı yapılabilen genişletilmiş geçirgen bir hattır ve numune tutucu olarak kullanılır. Malzemenin kalkanlama kapasitesini değerlendiren TEM hücresi metodu, ideal şartlar altında serbest uzayda yerleştirilmiş sonlu düzlem kalkan ile ilgilenilen bir geçirgen hatta, numune varlığını uzak alan koşulunda canlandırır ve matematiksel olarak Eş. 2.14 ile ifade edilir.

$$SE_{dB}=IA_{dB} \quad (2.14)$$

Burada IA : ilave zayıflama olarak tanımlanır. Bu model dünya çapında günümüzde kabul görmüş olup, ASTM ES7-83 (1988' de kaldırılmıştır) ve ASTM D4935-99 (2005 yılında kaldırılmış ve bazı küçük düzeltmelerle yeniden yayınlanmıştır) standartlarını temel almıştır. TEM hücresi metodu genel olarak, 50 Ω değerindeki karakteristik bir empedans değeriyle ve dairesel veya dikdörtgen kesit alanı ile gerçekleştirilir [33].

ASTM ES7-83

Bu metot, iletken bir dairesel eş eksenli geçirgen hat numune tutucusudur. Numune pul şeklindedir. Numune tutucu pul şeklindeki numuneyi içine yerleştirebilmek için parçalara ayrılabilir. Parçalar birleştirildiğinde numune tutucunun hem merkezinde hem de dışında metal parçaların birbirine temas etmesinden dolayı iletken olur. Bu metot 1 MHz ile 1.8 GHz frekans aralığında SE ölçümü almak için tasarlanmıştır [34].



Şekil 2.4. ASTM ES7-83 metodu için (a) ölçüm hücresi ve (b) numune geometrisi

Şekil 2.4' te bu metot için bir kesit ve numune geometri görüntüsü verilmiştir. Daha düşük frekanslar donanım ile sınırlandırılmıştır. Belirtilen üst frekanstan daha yüksek frekanslarda hücre içinde yayılacak yüksek mertebeden modlar başlayacak ve sivrilen kenar kısımlardan bu yüksek modlar yansıyacaktır. Yüksek mertebeden modların yansıma yapmasıyla güvenilir ölçümler almak oldukça zordur [35].

Yüksek mertebeden modların oluşmasını engellemek için ölçüm frekansı aşağıda verilen eşitlikle bulunan üst kesim frekansını aşmamalıdır.

$$f_{\max} < \frac{c}{\pi(D+d)} \quad (2.15)$$

Burada c ışık hızı, D dış iletkenin iç çapı, d ise iç iletkenin çapıdır.

Bu metot yıllar içerisinde farklı amaçlarla geliştirildi ve son gelişmelerle birlikte daha düşük kontak direnci ve yaklaşık 0 – 5 GHz aralığında ölçüm alınabilmektedir [33]. Bu ölçüm osiloskop, spektrum analizörü veya vektör ağ analizörü gibi sinyal kaynağı ve sinyal alıcısı kullanılarak gerçekleştirilir.

SE ifadesi numune olmadığı durumdaki (referans ölçüm) sinyal seviyesinin numune varken (yükü ölçüm) elde edilen sinyal seviyesine oranı olarak elde edilir [33]. Eğer sinyal birimi volt alınırsa;

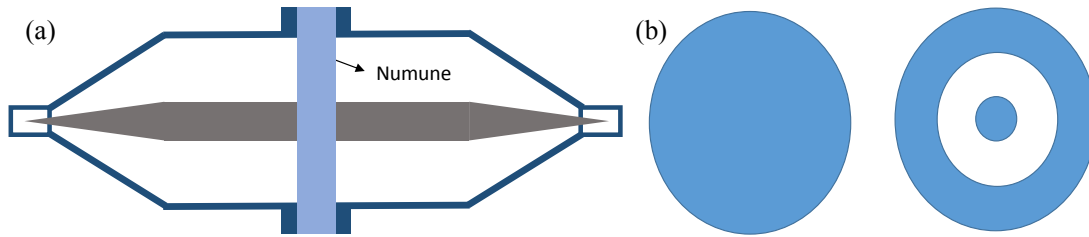
$$SE = 20 \log \left(\frac{V_i}{V_t} \right) \quad (2.16)$$

şeklinde elde edilir. Burada V_i referans ölçüm seviyesi, V_t numune test hücresi içerisinde iken alınan seviye değeridir.

ASTM D4935-99

Bu metot içindeki iletken hattın birbirine temas etmediği dış iletkenin ise yalıtkan bir bağlantıya sahip olduğu eş eksenli dairesel test hücresidir. Bu metot metal, iletken plastik ve yüksek elektriksel yüzey direncine sahip materyaller için ASTM ES7-83 metoduna göre daha doğru SE sonuçları elde etmeyi sağlar. Bu metot yüzeyi iletken malzemeler için ASTM ES7-83 ile benzerdir fakat iletken plastikler için flanşlar arası kapasitif çiftlenimi temel alır.

Bu standartta ölçümler 30 MHz ile 1.5 GHz aralığında yapılabilir ve üst kesim frekansı Eş. 2 ile elde edilir. Ancak son gelişmeler ile üst kesim frekansı 18 GHz' e kadar çıkarılmıştır. Ölçümleri yapmak için gerekli sinyal üretici ve alıcısı ASTM ES7-83' de gerekenler ile aynıdır.



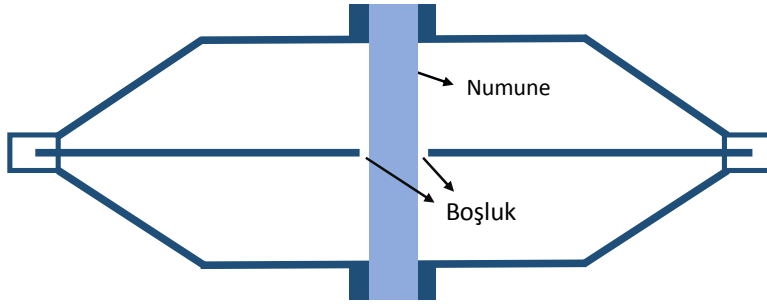
Şekil 2.5. ASTM D4935-99 standardı için (a) ölçüm hücresi ve (b) ölçüm numunesi

Referans ölçümü için flanşlar arasına, Şekil 2.5 (b)' de gösterilen geometride flanş boyutu ile uyumlu materyal parçası ile iç iletkenin çap değerinde olan disk materyal yerleştirilerek alınır. Yük örneği ölçümü için flanşa eşit çapta disk şeklinde numune kullanılır. Burada önemli olan referans ve yük örneğinin aynı malzemeden ve aynı kalınlıkta olması gerekir. Ölçümler sırasında ölçüm hücresinin parçaları, özellikle dış iletkenin parçaları birbiri ile temas etmemesi gerekir. Parçalar arası temas olduğunda temas empedansı numune ile seri halindedir ve sonucu değiştirecektir. Bu yüzden flanş bağlantısı iletken olmayan vida tarzı malzemeler ile yapılmalıdır [33]. Referans ve yük örneği ölçümleri yapıldıktan sonra SE değeri, ölçüm yapılan birime göre Eş. 2.16 ile belirlenir.

TEM-t hücresi

TEM-t hücresi kompozit malzeme, yalıtım malzemesi (plastik, silikon kauçuk, tekstil malzemeleri vb.), iletken tozlarla doldurulmuş malzemeler veya fiberler, ince iletken

kaplama yapılmış malzemeler, orta veya düşük iletkenliğe sahip ince numunelerin SE değerini belirlemede kullanılır. Test hücresi ASTM D4935-99 hücresi gibi 2 parçadır ve Şekil 2.6' da gösterildiği gibi kısmen benzemektedir. Dış iletkenin her bir parçası, yüksek kapasitif çiftlenim için büyük dikdörtgen flanşlı ve gittikçe daralan bir yapıya sahiptir. Ayrıca numune ile doğrudan teması önlemek için flanşların olduğu düzlemden yaklaşık 1 mm öncesinde sonlanan iç iletken vardır. Tasarım numunenin iletken yüzeyinden bağımsız bir kapasitif birleşme mekanizması sağlar.

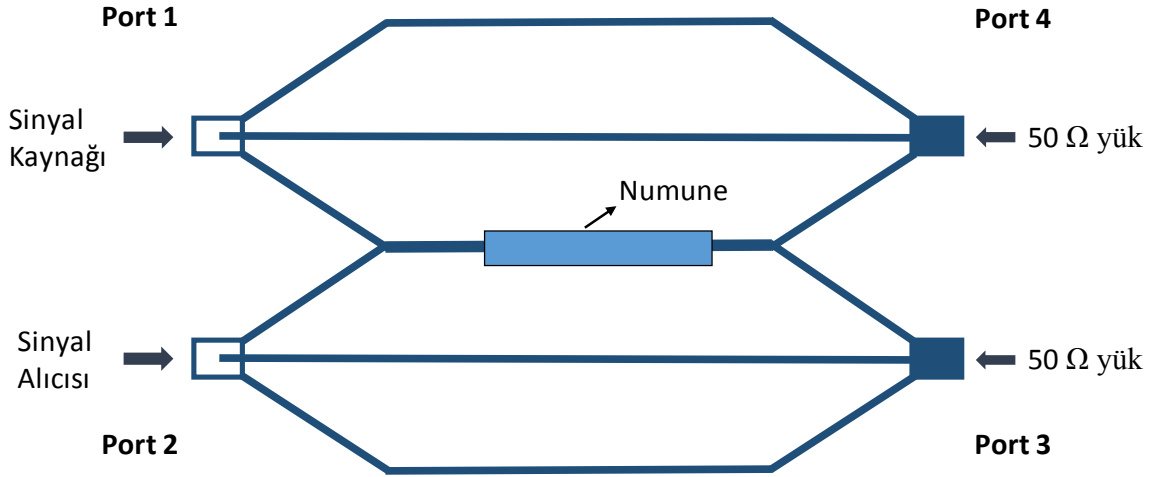


Şekil 2.6. TEM-t hücresinin temsili gösterimi

Ölçümler önceki metotlarda belirtildiği şekilde alınır. Referans ölçüm sırasında flanşlar arası numune yokken, yük ölçümünde ölçüm numunesi flanşlar arasında bulunmaktadır. Ölçüm frekans aralığı, hücre boyutlarından dolayı yaklaşık 1 GHz ile sınırlandırılmıştır. Ancak TEM şartlarında, yüksek modlar asimetrik oluşum kaynaklı olması nedeniyle ve TEM-t hücresi simetrik olduğundan dolayı hücre 12 GHz' e kadar kullanılabilir [33].

Çift TEM hücresi

Aynı açıklığa sahip iki adet TEM hücresinin, açıklığa numune konulup ve iki hücrenin bağlantılarının yapılarak SE ölçümünün alındığı metottur. Hücrelerden bir tanesi sürücü hücredir ve güç akışını açıklıktan alıcı olarak davranan diğer hücreye iletir.



Şekil 2.7. Çift TEM hücresi için bir şema

Uzak alan etkileşimlerini belirleyen eş eksenli TEM hücrelerinin aksine, bu yöntem yakın alan etkileşimlerini belirlemede kullanılabilir. Şekil 2.7’ de gösterildiği gibi verilen bir giriş sinyali için çıkış sinyali ya port 2 den ya da port 3 den ölçülebilir. Diğer port 50 Ω ’ luk bir yük ile sonlandırılmıştır.

Açıklık çiftlenim enerjileri, iki dış portun asimetrik olmasından dolayı, ileri ve geri bağlantı noktası, çıkış sinyal ölçümü eklenerek veya çıkartılarak numune boyunca elektrik alan ve manyetik alan çiftlenimini ayrı ayrı belirleyebilir. Böylece kalkanlama etkinliğinin elektrik alan (SE^e) ve manyetik alan (SE^m) değerleri aşağıdaki eşitlikler kullanılarak:

$$SE_{dB}^e = 20 \log \left| \frac{\Sigma_i}{\Sigma_t} \right| \quad (2.17)$$

$$SE_{dB}^m = 20 \log \left| \frac{\Delta_i}{\Delta_t} \right| \quad (2.18)$$

elde edilir.

Burada Σ_i numune olmadan ileri ve geri bağlantı noktası sinyal ölçümü toplamı ve Σ_t numune varken ileri ve geri bağlantı noktası sinyal ölçümü toplamıdır. Benzer şekilde Δ_i numune olmadan ileri ve geri bağlantı noktası sinyal ölçümü farkı ve Δ_t numune var olduğu durumda ileri ve geri bağlantı noktası sinyal ölçümü farkıdır. Alıcı hücrenin ileri ve geri bağlantı

noktası sinyalleri için fark ve toplam ölçümünde bir vektör ağ analizörü (VNA) kullanılabilir [33].

Aralıklı TEM hücresi

Bu metot çift TEM hücre metodu ile benzerdir fakat sürücü TEM hücresi yerine bir yankı odası alan kaynağı olarak kullanılır. Yankı odası yalıtılmış bir odadır. Bu oda içerisindeki ortalama dalga empedansı yaklaşık olarak serbest uzayınki ile aynıdır.

Sürücü TEM hücresinin aksine, yankı odası dağılım olarak eşit bir düzlem dalga alanı oluşturur. Alan kaynağı konusunda bu teknik yüksek frekanslarda daha iyidir. Sistem çalışma üst frekansı Eş. 2.15' e bağlı olarak alıcı hücresindeki yüksek modların meydana gelmesine bağlı olacaktır. Bu sebeple, yüksek frekans avantajından yararlanmak için küçük boyutlu bir alıcı hücresi kullanılmalıdır.

Bu tekniğin bir dezavantajı, 1 GHz altındaki frekanslarda ölçüm süresinin uzun zaman almasıdır. Yankı odası yapısından dolayı 1 GHz üzerindeki frekanslarda ölçümler daha kısa sürede tamamlanmaktadır [33].

2.6.2. Anten ve elektrik-manyetik alan problemleri kullanılan ölçümler

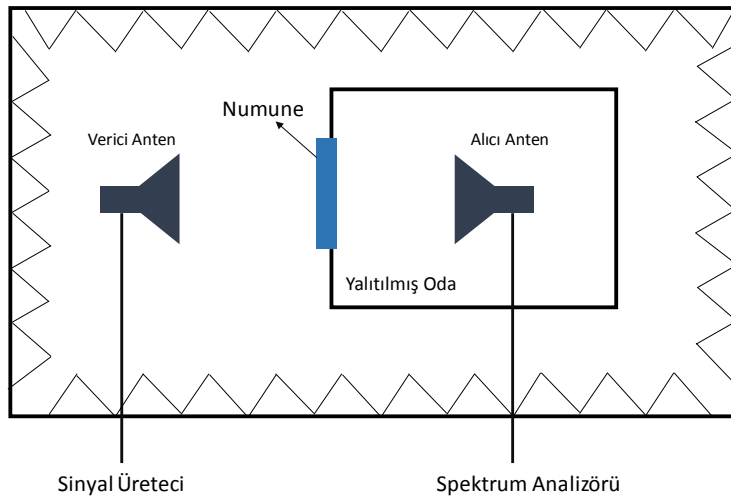
MIL-STD -285 temelli metotlar

ABD ordusu tarafından askeri amaçlı olarak 100 kHz – 10 GHz aralığındaki frekanslar için SE değeri belirlemede kullanılır. Bu sınıf bir ölçüm tekniği genel olarak MIL-STD-285 tekniğinin değiştirilmiş versiyonudur. Bu teknikte, doğru bir şekilde yalıtılmış pencere açıklığına sahip bir kafeste, test edilecek numunenin bu pencereye yerleştirilerek istenilen frekans aralığında elektromanyetik dalgaya maruz kalmasıyla test gerçekleşir. Referans ve yük ölçümü olmak üzere iki ölçüm yapılarak SE değeri bulunur. Referans ölçüm sırasında numune pencere boşluğuna yerleştirilmeden verici anten vasıtasıyla test sinyali yayınlanır. Yük ölçümünde ise numune pencere boşluğuna düzgün bir şekilde yerleştirilerek test sinyali yayınlanır ve ölçüm yapılır. Ölçümler sırasında antenler aynı pozisyonda bulunmalıdır. Numune pencerenin tamamını kapatmalıdır ve bir elektromanyetik conta ile iyice montelenerek sızıntılar önlenmelidir. SE değeri Eş. 2.16 ile alınan birime göre belirlenir.

MIL-STD-285 tekniğinde 50 Hz ile 100 GHz aralığında minimum 2 m boyutlu kafes SE ölçümü için tanımlanmıştır ve IEEE-STD-299 tarafından değiştirilmiştir. Bu frekans aralığı;

- 1-) 50 Hz-20 MHz → manyetik alan
- 2-) 20 MHz-300 MHz → elektrik alan
- 3-) 300 MHz -100 GHz → düzlem dalga

şeklinde olmak üzere üç alt frekansa ayrılmıştır [33]. Burada önemli olan her bir alt frekans için uygun anten kullanılmalıdır. Bu metotta malzemenin SE değerini belirlemek için farklı versiyonlar mevcuttur. Bunlardan bir tanesi 1 GHz üzeri ölçümler için Şekil 2.8’ da verilmiştir. Bu durumda verici anten ile alıcı antenin içinde bulunduğu yalıtılmış oda, yankısız bir oda içerisinde bulunmaktadır.



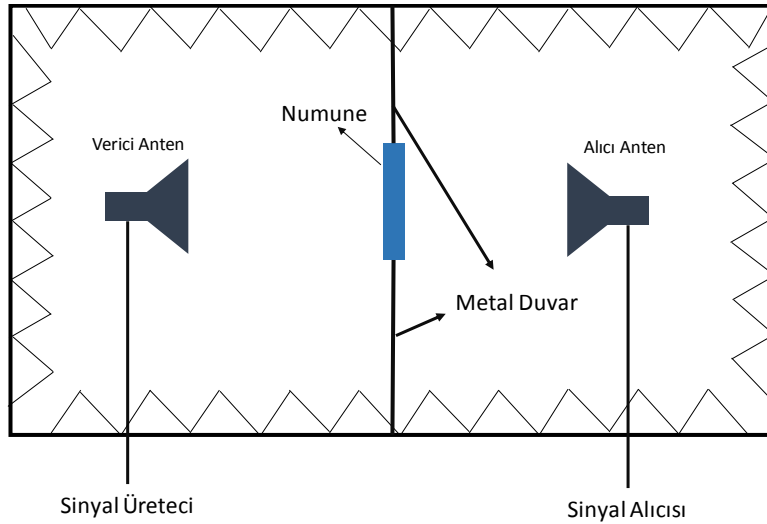
Şekil 2.8. MIL-STD-285 tekniğinde 1 GHz ve üzeri frekanslar için ölçüm şeması

Sinyal üretici ve spektrum analizörü yankısız oda dışındadır ve bunlar antenler ile eş eksenli kablo bağlantısına sahiptir. Ayrıca bazı rezonans problemlerini bertaraf etmek için farklı versiyonlarda geliştirilmektedir.

Serbest uzay metodu

Schelkunouf kalkanlama teorisi; düzlem dalgaları, serbest uzayda, belli bir kalınlıktaki sonsuz düzlem kalkanı ortamını varsaymaktadır. Serbest uzay metodu, SE ölçümlerinin kalkanlama teorisindeki ortama benzemesi açısından geliştirilmiştir. Bu ortamı oluşturmak

için yankısız oda oluşturulmalıdır. Serbest uzay ortamı oluşturabilen bir yankısız odanın duvarları, gelen enerjinin çoğunu soğuracak malzeme ile kaplanmış olmalıdır. SE ölçümü için, Şekil 2.9’ da gösterildiği gibi numune ve antenler yankısız oda içerisinde bulunmalı ve ölçüm sistemi cihazları (VNA, sinyal jeneratörü) girişimden etkilenmemek için oda dışında bulunmalıdır.

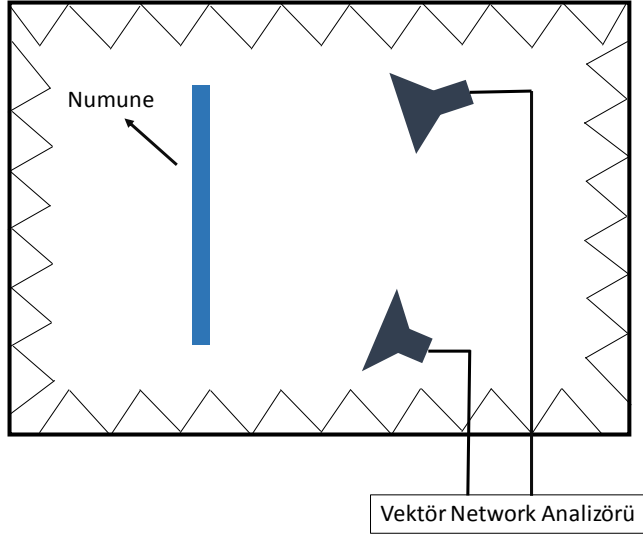


Şekil 2.9. Serbest uzay metodu için ölçüm şeması

MIL-STD -285 ile kıyaslandığında kırınım etkisinden kaçınmak için numune boyutu oldukça büyüktür (>1 m) [33]. Ayrıca numune, odayı iki parçaya bölen metal duvar üzerindeki bir pencereye monte edilir. SE değeri ise diğer metotlarda olduğu gibi numune varken ve yokken sinyal seviyelerinin kıyaslanmasıyla belirlenir.

Yansıtma tekniği

Diğer bir SE belirleme yöntemi ise yankısız oda içerisinde yansıtma tekniğidir. Şekil 2.10’ da gösterildiği gibi alıcı ve verici antenler açılı olacak şekilde numunenin aynı tarafındadır ve dışarıdan VNA bağlantısı vardır.

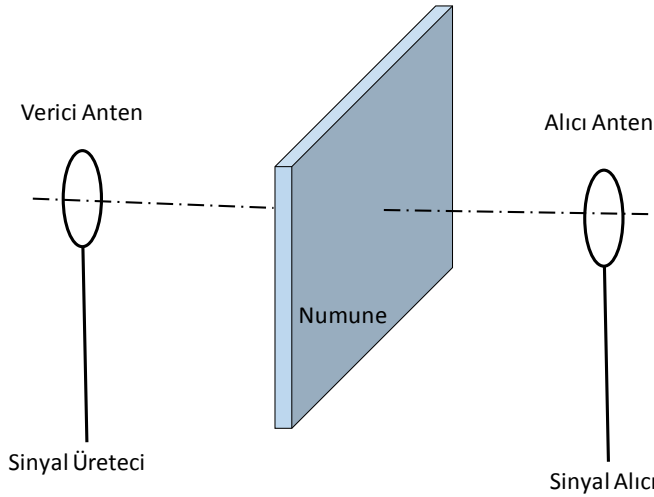


Şekil 2.10. Yansıtma tekniğine ait ölçüm şeması

Bu yöntemde SE belirlenirken metalik bir referans numune tarafından yansıtılan sinyalin ölçülmesiyle ve yük ölçümü ise numunenin, metalik referansın yerine konularak ölçümün tekrarlanmasıyla elde edilir. Kaydedilen değerler, SE değerini belirleyecek bir hesaplama algoritmasına eklenerek bulunur. Ayrıca bu teknikte malzemenin elektrik ve manyetik özellikleri belirlenebilir [33].

Yakın manyetik alan

Bu teknik Şekil 2.11’ de gösterildiği gibi, eş eksende olan 2 küçük döngü antenin ortasına numune yerleştirilerek ölçüm alınır. Verici döngü anteni, numuneye dik manyetik alan oluşturur. Anten konumları değişmeksizin, numune varken ve yokken alınan ölçümler, manyetik SE değerini Eş. 2.16’ da manyetik alan birimi cinsinden belirlemeye yarar. Benzer bir ölçümle elektrik alan ölçümü de gerçekleştirilebilir.



Şekil 2.11. Yakın manyetik alan tekniğine ait bir şema

Özet

Eş eksenli TEM hücreleri yakın ve uzak alan etkileşimlerini belirlemede kullanılan yöntemlerdir. Uzak alan etkileşimleri ASTM ES7-83, ASTM D4935-99 ve TEM-t hücresi metotları ile belirlenirken, yakın alan etkileşimleri çift TEM hücresi ve aralıklı TEM hücresi metotları ile belirlenmektedir.

ASTM ES7-83 metodunun önemli bir avantajı kapalı bir ortamda dışarıdan gürültü içeri sızmadan eş eksenli test ortamı sunmasıdır. Bu sayede ne yalıtılmış bir kutuya ne de yankısız odaya ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca bu metot ile nispeten daha geniş frekans aralığında ölçümler yapılabilmesi (yaklaşık 1.5 GHz'e kadar) ve küçük boyutlu numune gerektirmesi ciddi birer avantajdır. Üst kesim frekansı, TEM hücre boyutu azaltılarak artırılabilir ancak bu durum daha küçük boyutlu test numunesi gerektirecektir ve numuneyi ölçüm geometrisi için hazırlamakta zorluklar oluşturacaktır. Ayrıca bu teknikte güvenilir sonuçlar hücre iletkenleri ile test numune arasında iyi bir kontak direnci başarılar sağlanmaktadır.

ASTM ES7-83 tekniğindeki avantajlara ilave olarak, ASTM D4935-99 metodu flanş kullanarak hücre ve numune arasındaki kontak direncini daha iyi bir şekilde sağlamaktadır. Ancak bu teknikte, ölçümün tekrarlanabilirliği açısından referans ve yük ölçümünde numunelere aynı basınç uygulanmalıdır.

TEM-t hücresi, daha dar bir frekans aralığına sahiptir ve boyutlarından dolayı 1 GHz ile üst kesim frekansı sınırlandırılmıştır. Düşük iletkenliğe sahip numunelerin SE değerini belirlemede tercih edilir.

Eş eksenli TEM hücre metodunu temel alan çalışmalar için, nispeten düşük frekanslarda deney ve teori sonuçları uyumludur. Bu durum, düşük frekanslarda numunelerin elektriksel ince olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Elektriksel kalın olduğu durumlarda teori ile deneysel sonuçlar uyumsuz çıkmaktadır ve SE değeri frekansın fonksiyonu olarak düzgün bir artış göstermemektedir.

Çift TEM hücresi yakın alan etkileşimlerini belirlemede, ortamın gürültü etkisinde kalmadan başarılı olmaktadır. Bu metot elektrik ve manyetik alan SE değerini verebilmektedir. Ancak elektrik ve manyetik alan SE değerini belirlemede karmaşık matematiksel hesaplamalar gerektirmesi, zorlu bir yöntem olarak anılmasına neden olmuştur. Ayrıca bu teknik ile elde edilen sonuçlar, çoğunlukla malzeme ve test sistemi arasındaki temas direncine bağlıdır.

Aralıklı TEM hücresi, çift TEM hücresi avantajlarına ilaveten, istatistiksel olarak gelen alan iyi tanımlanmıştır. Sistemim üst kesim frekansı alıcı hücrenin boyutlarına bağlıdır. Daha doğru sonuçları elde etmek için düşük kontak direnci gerekmektedir.

Son olarak, serbest uzay ve MIL-STD-285 temelli teknikler nispeten büyük boyutlu numunelere ihtiyaç duyar ve teorik olarak tam doğrulanmamıştır. Ancak bu teknikler test koşullarına çok benzer ortamlar sunduğundan ciddi bilgiler sağlamaktadır.

Bunların dışında bu ölçüm yöntemlerindeki düzeneklerde kısmi değişiklikler yapılarak ölçümlerin alındığı çalışmalarda mevcuttur [36,37]. Bu tarz çalışmalar ya ölçüm alınacak malzemenin ya da ölçüm sisteminin belirli kısıtlamalara sahip olmasından dolayı geliştirilmektedir.

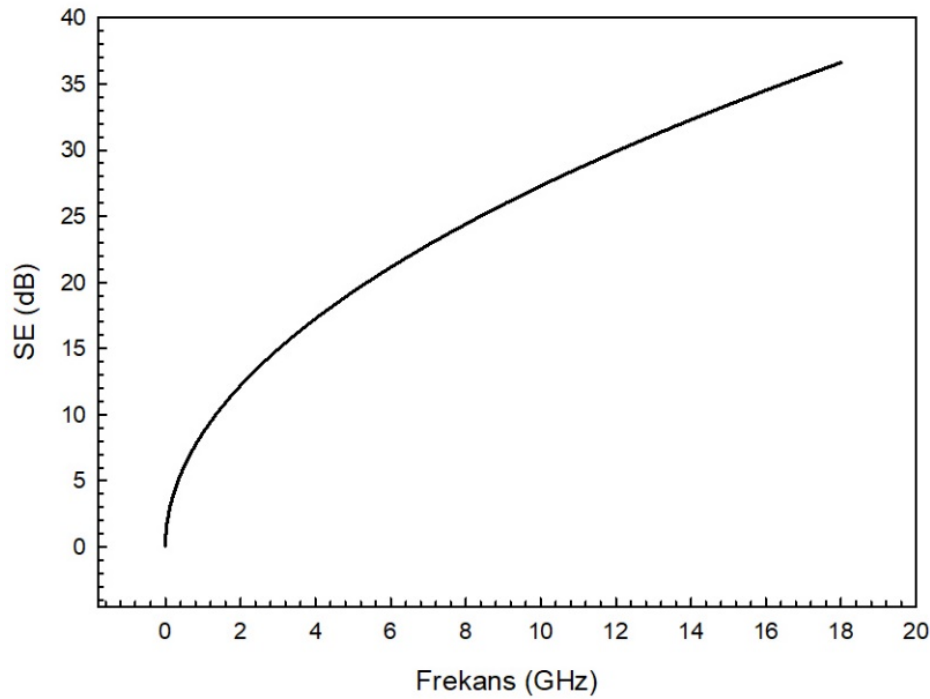
2.7. Optik Pencereelerde EMI Kalkanlama Yöntemleri

Elektro-optik sistemler sahip oldukları optik açıklıktan dolayı EMI' dan özel yöntemlerle korunmaları gerekmektedir. Elektro-optik sistemin hangi spektrum aralığında çalıştığına, sahip olduğu pencere özelliklerine, hangi şartlar altında kullanılacağına ve hatta pencere

arkasında bulunan detektör parametrelerine göre EMI kalkanlama yöntemleri değişmektedir. Bu alanda farklı kullanım amacına uygun olarak geliştirilen ve kullanılan bazı temel yöntemlerden bahsedeceğiz.

2.7.1. Yarıiletken malzeme kullanımı

Si ve Ge gibi yarıiletken malzemelerin elektro-optik sistemlerde kullanılması durumunda, kısmi iletkenliğe sahip olduklarından dolayı EMI kalkanlayıcı olarak davranacaklardır. Ayrıca Si ve Ge gibi yarıiletkenlerin, iletken olmayan dış pencere kullanan kamera sistemlerinde, iç optik eleman olarak kullanımı da uygun dalga boylarında mümkündür. Şekil 2.12' te $10 \Omega \cdot \text{cm}$ öz dirençli ve 5 mm kalınlıklı Ge optik pencere için Eş. 2.8 kullanılarak, soğurma kaybı ile oluşacak SE değeri verilmiştir.



Şekil 2.12. $10 \Omega \cdot \text{cm}$ öz direnç ve 5 mm kalınlıkta Ge için soğurma kaybı

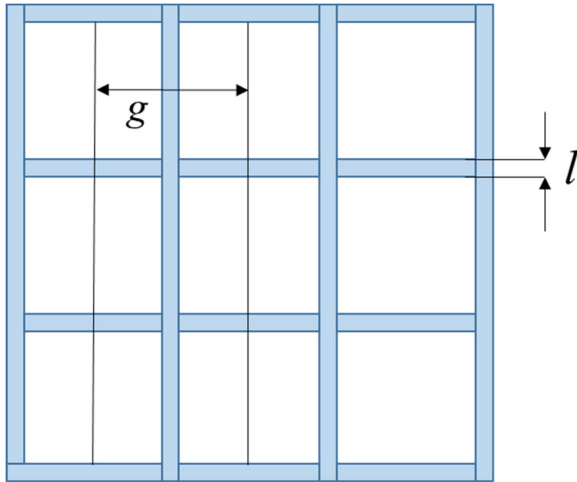
EMI kalkanlama performansının iyileşmesi için ya pencere kalınlığının ya da iletkenliğin artması gerekecektir. Elektro-optik sistemlerde tasarım aşamasında uygun kalınlık değeri belirlenebilir ve kristal büyütme sürecinde ise uygun kristal iletkenliği belirlenerek istenilen EMI kalkanlama performansı oluşturulabilir. Ancak her iki durumda (kalınlık ve iletkenliğin artması) optik kayıplar oluşacaktır. Ayrıca bu tarz malzemelerin optik gereksinimleri sağlaması gerektiği dikkate alınmalıdır.

2.7.2. İnce film kaplama

Görünür bölge uygulamaları için daha çok tercih edilen sürekli ince film kaplamalar yüksek optik geçirgenliği nedeniyle tercih edilmektedir. Ayrıca herhangi bir fotolitografik yöntemde içermemesi bu yöntemi cazip kılmaktadır. ITO (indiyum kalay oksit), AZO (Al katkılı çinko oksit) gibi genellikle metal-oksit yapılar tercih edilmektedir. Ancak kızılötesi bölgede ciddi anlamda optik kayıplar oluşturduğu için, bu tarz sürekli kaplamalar IR uygulamaları için pek kullanılamamaktadır.

2.7.3. Metalik örgü kaplamalar

Metalik örgü kaplamalar, elektro-optik sistemlerde EMI kalkanlayıcı ve ısıtıcı eleman olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak metalik örgü desenleri görüntüde bazı azalmalara ve bulanıklığa sebep olabilir. Bunu en aza indirmek için metalik örgü geometrisi tasarım aşamasında iyi planlanmalıdır. Şekil 2.13' te periyodik kare metalik örgü geometrisi şematize edilmiştir.



Şekil 2.13. Kare metalik örgü yapısına ait g ve l parametreleri

Burada l çizgi genişliği, g ise çizgiler arası boşluktur.

Metalik örgüler için EMI kalkanlama ilgilenilen dalga boyuna bağlı olup örgünün $\lambda > g$ şartını (λ , dalga boyu) sağlaması gerekmektedir [13]. Yani örgünün en önemli karakteristiği çizgiler arası boşluktur (g). Verilen bir frekans için daha küçük g değeri daha iyi kalkanlama anlamına gelmektedir. Ancak g değerinin küçültülmesi ve l değerinin artması birim alan

başına düşen açıklığın azalması demektir ve bu da optik geçirgenlikte azalmaya sebep olacaktır. Şeffaf metalik örgüler için çizgi genişliğinin artması hem optik geçirgenliğe küçük hem de EMI kalkanlamada çok az bir değişim oluşturur [13]. Bu yüzden g parametresi daha kritik öneme sahiptir.

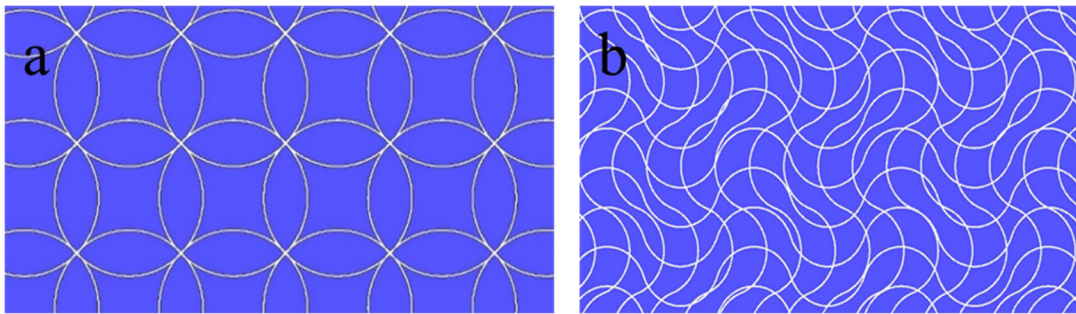
Metalik örgüde temel amaç EMI kalkanlama performansını sağlayacak olan metalik örgünün minimum optik kaybı göstermesidir. Bunun için metalik örgü tasarımı aşamasında ilk dikkate alınan değer optik geçirgenliktir. Ayrıca yüksek EMI kalkanlama elde edebilmek için düşük elektriksel yüzey dirence sahip bir yüzey elde edilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

Optik geçirgenlikte istenilen değere ulaşılabilmesi için metalik örgü yapısının çizgi (l) ve çizgiler arası boşluk (g) parametreleri dikkate alınmalıdır. Periyodik kare metalik örgü için aşağıda optik geçirgenlik (OT) ifadesi verilmiştir.

$$OT = \left[\frac{g-l}{g} \right]^2 + \left(1 - \left[\frac{g-l}{g} \right]^2 \right) k \left[\frac{g-l}{g} \right]^4 \quad (2.19)$$

burada k , 1 ile 1.5 arasında bir sabittir [38,39].

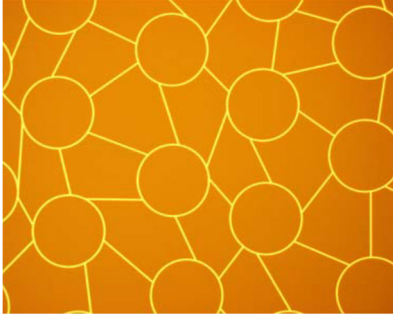
Metalik örgü kaplamalar elektro-optik sistemlerde pencereler için söz konusu olunca, optik kayıplar ve metalik örgünün arkasında bulunan detektör üzerinde oluşturduğu kırınım deseni ciddi bir önem arz etmektedir [13, 40, 41]. Bunun için farklı geometri tasarımları yapılarak kırınım etkisi minimize edilmelidir. Şekil 2.14' te kırınım etkisini azaltmak için geliştirilen geometrilerden bazıları verilmiştir.



Şekil 2.14. Metalik örgü desenleri örnekleri, (a) periyodik dairesel, (b) uç uca yarım daire

Metalik örgülerin arkasında oluşturdukları kırınım deseni, kullanılan metalik örgü

geometrisine bağlıdır. Günümüzde EMI kalkanlayıcı olarak, mevcut kullanılan çember ve çizgi, ızgara türü, elips, daire ve bu geometrilerin rastgele dağılımı gibi birçok çeşit metalik örgü geometrisi uygulanmaktadır [40,41]. Şekil 2.15’ da rastgele dağılımlı çember ve çizgi geometrisine ait bir görsel verilmiştir. Bu geometrileri geliştirme üzerine halen ciddi çalışmalar yapılmaktadır. Bu farklı geometriler, detektör üzerinde oluşacak kırınım desenlerinin sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Kırınım deseni etkilerinin en az olduğu geometri çember ve çizgi olmasına rağmen bu geometrinin uygulamasında için ciddi zorluklar mevcuttur. Uygulaması ve tasarımı en kolay ve pratik olanı periyodik kare örgü geometrisidir.



Şekil 2.15. Rastgele dağılımlı çember ve çizgi geometrisi [41]

Metalik örgü geometrisinin kırınım deseni, örgü geometrisine bağlıdır ve bu kırınım deseni, seçilen örgü geometrisinin optik sistem üzerindeki etkisi hakkında bilgi verir. Birçok çalışma farklı kırınım deseninin komşu pikseller üzerine etkisini görebilmek üzere yapılmıştır. Bu çalışmalar, ana demet enerji yoğunluğunun metal örgü geometrisinden bağımsız olduğunu göstermiştir. Ana demet enerji yoğunluğundaki kaybın, örgüden yansıyan enerji değeri ile aynı olduğu bilinmektedir [13].

Kırınım deseninde oluşan aydınlık saçakların, komşu piksel üzerinde gürültü oluşturmamasından dolayı birçok çalışma aydınlık saçak enerji dağılım yoğunluğu üzerine odaklanmıştır. Elektro-optik sistemler için geliştirilen çember ve çizgi tasarımları, komşu piksel üzerinde en az gürültü oluşturan geometridir [13].

Çember ve çizgi geometrisinin dezavantajı, desenin uygulanmasındaki zorluktur. Bu işlemin fotolitografik yöntemlerle uygulanmasında, örgü parametre boyutları ne kadar küçükse uygulamada giderek zorlaşacak ve maliyetli olacaktır. Ayrıca bu tarz geometrilerin maske üretim aşaması da aynı şekilde zordur.

Kırınım deseni teorisinde, ana demete en yakın aydınlık saçak ikincil aydınlıktır. İkincil aydınlık, ana demetten yaklaşık $\Delta\theta$ kadar ayrıdır ve aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\Delta\theta = \lambda/l \quad (2.20)$$

burada λ , hedef dalga boyu ve l ise çizgi genişliğidir [13].

Özel sistemler tasarlanıyorken, eğer sistemde görüş açısı ikincil aydınlık kırınım açısı ile kıyaslandığında çok küçükse, normal optik geçirgenliği sağlayan herhangi bir örgü geometrisi kullanabilir.

En iyi EMI kalkanlama performansı ve yüksek optik geçirgenlik için optimize edilmiş g ve l değerleri belirlemek önemlidir. Maksimum SE değerini, yüksek frekanslarda elde etmek için çizgiler arası boşluk mümkün olduğunca küçük olmalıdır. Ayrıca kaplama kalınlığı, etkin elektriksel yüzey direncini belirleyici temel parametrelerden biri olacağı da bilinmektedir. SE değeri ise etkin elektriksel yüzey direncine göre büyük bir değişiklik gösterecektir.

Bundan sonraki adım ise optik geçirgenlik gereksinimleri için g ve l oranı belirlemektir. Böylece maske oluşturma ve kaplama sürecindeki fiziksel kısıtlamalarda dikkate alınarak, en küçük çizgi genişliği ve çizgiler arası boşluk belirlenir. Deneysel çalışma sürecindeki fiziksel kısıtlamalar, örneğin en küçük çizgi genişliğine belirlemek genellikle temel parametredir. Bu değer hem maske hem de kaplama işlemi için farklılık gösterebilir. Bu bilgilerden sonra çizgi genişliği ve çizgi boşluğu belirlenebilir.

3. KULLANILAN DENEYSEL TEKNİKLER

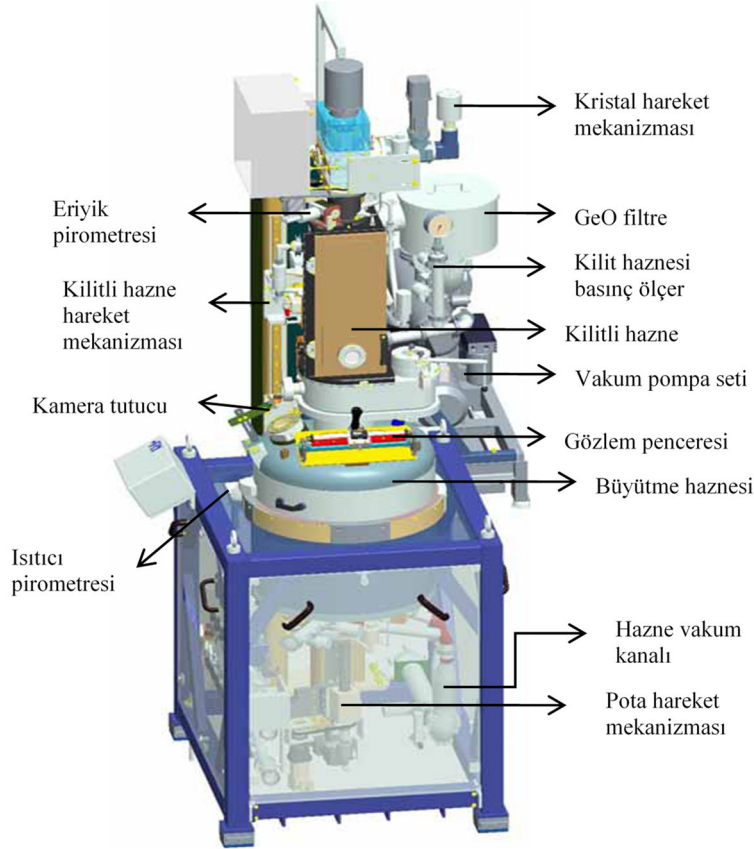
Sb katkılı Ge kristallerin EMI kalkanlama etkinliğinin belirlenmesi ve geliştirilmesi konusunda yapılan bu tezde, farklı katkı yoğunluklarında Ge tek kristalleri Czochralski tekniği ile büyütüldü. Büyütülen kristaller, dilimleme, taşlama ve parlatma işlemlerinin ardından optik pencere haline getirildi. Elde edilen farklı optik pencereler üzerine farklı amaçlarla kaplamalar yapıldı. Metalik örgü kaplaması ile EMI kalkanlama performansını artırmak ve ısıtıcı davranışını belirlemek amaçlandı. Yansıma önleyici kaplama sayesinde uzak kızılötesi (LWIR) bölgesinde yüksek optik geçirgenlik hedeflendi. Optik pencerelerin ve yapılan yansıma önleyici kaplamaların kristal parametreleri X-ışını kırınım sistemi ile belirlendi. Üretilen ve çeşitli kaplamaları yapılan pencerelerin, kızılötesi optik geçirgenliği FTIR tekniği ile incelendi. EMI kalkanlama etkinliği 1 inç (25,4 mm) çaplı numuneler için ASTM D4935-99 standardı temel alınarak geliştirilen TEM metodu ile belirlendi. Ayrıca ısıtıcı davranışı, farklı gerilimler altında zamana bağlı olarak incelendi. Belirlenen ısıtıcı davranışına göre, Ge pencereler için sıcaklık bağımlı kızılötesi optik geçirgenlik belirlendi.

3.1. Numune Üretim Aşamaları

Bu bölümde, çalışmamızda kullanılan üretim ve analiz yöntemleri, kullanım amacına yönelik olarak tanıtıldı ve yaptığımız çalışmalar özetlendi.

3.1.1. CZ kristal büyütme sistemi

Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan ve çalışmamızda kullanılan CGS-Lab-Ge Czochralski sistemine ait şema Şekil 3.1' de ve sisteme ait görüntü Resim 3.1' de verilmiştir.



Şekil 3.1. CGS-Lab-Ge sistemi

Büyütme sistemi maksimum 300 mm uzunluğunda ve 102 mm çapında Ge tek kristali büyütme elverişlidir. Kristaller gerekli katkılama işlemi yapılarak n-tipi ve p-tipi olarak büyütülebilmektedir. Büyütme aşamasında yüksek saflıkta Ar gazı kullanılmaktadır.

Kristal çapı, sisteme monte edilmiş kamera tarafından alınan verileri, görüntü işleme yazılımları tarafından belirlenmektedir. Ayrıca büyütülen kristal ağırlığını belirlemede 10 gr hassasiyetli bir ağırlık sensörü bulunmaktadır.



Resim 3.1. Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan CZ sistemi

Düzgün bir sıvıdan katıya geçiş oluşturmak için, sıcak bölge de bulunan tüm grafit malzemeler ve sıcak bölge haznesi, özel olarak tasarlanmış ve ısı dağılımı bu tasarım sonucu ortaya çıkmıştır. Kristal hareket mekanizması hem saat yönünde hem de saat yönü tersinde dönme hareketine izin verirken, halatlı çekme mekanizması kristalin aşağı ya da yukarı hareketini sağlar. Aynı şekilde pota hareket mekanizması da mevcuttur.

Sistem üzerinde sıcaklığı belirleyebilmek için 2 adet pirometre bulunmaktadır. Bunlardan biri ısıtıcı sıcaklığını belirlerken diğeri ise eriyik sıcaklığını belirlemek için kullanılır. Eriyik sıcaklığını belirleyen pirometre, daldırma noktasından yaklaşık 1 cm uzaklıktaki bir noktaya odaklıdır. Isıtıcı sıcaklığı ise ısıtıcı üzerine odaklı olan pirometre ile belirlenir. Sistem tamamen bilgisayar kontrollü olup manüel, yarı otomatik ve otomatik kullanım şeklinde kontrol gerçekleştirilebilir.

Tez kapsamında Ge tek kristalleri, yaklaşık 5 – 40 Ω .cm öz direnç aralığında ve (111) yönelime sahip olacak şekilde büyütülmesi hedeflendi ve büyütme işlemlerinde %99,9999

(6N) Ge ve %99,99999 saflıkta (7N) Sb yükleme malzemeleri kullanıldı. Farklı öz direnç değerlerine sahip Ge optik pencereler elde edebilmek için katkı miktarları pota içerisine farklı seviyelerde katılarak gerçekleştirildi. Katkı malzemesi olarak antimoni (Sb) tercih edilmiştir. Yapılan kristal büyütme işlemlerinde kullanılan ham malzeme (Ge), katkı malzemesi (Sb) miktarları ve elde edilen ürünler hakkında detaylar Çizelge 3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Büyütülen kristaller ve katkı miktarları

Numune Adı	Katkı Maddesi	Sb Miktarı (mg)	Ge miktarı (kg)
GCZ017	Sb	60	13
GCZ018	Sb	65	13
GCZ019	Sb	70	13

Kristal büyütme işlemi, kristali oluşturan kısımların aşamalar halinde gerçekleşmesiyle olmaktadır. Bu aşamalar sırasıyla; boyun, omuz, gövde ve son koni şeklindedir. Her bir aşamada farklı parametreler kullanılmaktadır ve dolayısıyla kristal çapı farklı olmaktadır. Kristal büyütme işlemlerinden önce büyütme sistemi, sistem içi temizlik amacıyla, pota sıcaklığı 1200 °C’ de iken 2 saat vakum altında bekletilmiştir. Bu ısıl işlemin amacı, buharlaşabilen kirliliklerin sistem içinden özellikle potadan uzaklaştırılmasıdır. Aşağıda büyütme işlemi adımlar halinde verilmiştir.

Temizlik aşaması

Cihaz içerisinde herhangi bir kirliliğin kalmaması için toz bırakmayan alkollü bir bezle temizlenecek kısımlar iyice temizlendi. Sıcak bölgedeki tüm grafit parçalar kontrol edilerek pota ve üst yalıtım malzemesi dışında tüm grafit parçalar yerleştirildi. Bu aşamadan sonra yükleme aşamasına geçildi.

Yükleme aşaması

Pota içerisine 13 kg Ge ve katkı malzemesi (60 mg Sb) dikkatli bir şekilde yerleştirildi. Gerekli son kontrollerden (rehber kristal, Ar gazı ve bazı sensörler) sonra sistem kapatılıp vakuma alınmaya başlandı. Yaklaşık 10^{-3} mbar basınç değerine mekanik pompa yardımıyla gelen sistem, uygun reçete seçimi sonrasında otomatik kullanıma geçildi.

Vakum testi

Büyütme öncesinde sistem, iç atmosfer temizliği yaparak sızdırmazlık testi gerçekleştirmektedir. Atmosfer temizliğini 8 kez tekrarlanarak gerçekleştirildi ve sızıntı testinde, sızıntı limiti aşılmadığı için bir sonraki aşama olan eritmeye geçildi.

Eritme

Isıtıcı gücü kademeli olarak artırıldı ve pota içerisindeki malzemelerin erimesi sağlandı. Ar gaz akışı ve kristal – pota dönme hareketleri (zıt yönlerde) bu aşamada başlamaktadır. Eriyik sıcaklığı yaklaşık 1050 °C' a kadar ulaştı ve Ge külçeler tamamen eridi.

Daldırma

Sistem manuel kullanım durumuna getirildi. Rehber kristalin (Ge (111)) sıvı haldeki Ge ile temasını sağlamak için, rehber kristal ve pota daldırma konumuna getirildi. Bu sırada eriyik sıcaklığı yaklaşık 937 °C' ye getirildi. Kameranın çap değerini ölçmesi için gerekli olan ayarlamalar yapıldı. Bu sırada uygun şartlar gözlemlendi ve sistem otomatik kullanıma alınarak büyütme işlemi başlatıldı.

Boyun

10 cm uzunluğunda büyütülen küçük çaplı boyun, termal şoktan dolayı oluşan dislokasyonları sonlandırma amaçlıdır. Kristal çekme hızı nispeten artırılarak ($\approx 1\text{mm/dk}$), dislokasyonların kristal dışında sonlandığını, çap değerinde anormal değişimle belirlendi. Bu şekilde dislokasyonları 10 cm uzunluk boyunca 3 kez gerçekleşti. 10 cm uzunluk tamamlandığında omuz aşamasına geçildi.

Omuz

Küçük çaplı boyun kısmından, kristal çapının istenilen değerine kademeli geçişin yapıldığı aşamadır. Bunun için çekme hızı, sıcaklık ve döndürme hızlarında değişiklik yapılarak çap değerinde artış sağlandı. Hedeflenen çap değerine ulaşıldığında sistem otomatik olarak gövde aşamasına geçti.

Gövde

Kristal çapının sabit olarak büyüdüğü aşamada, kristal argon gaz akışı etkisiyle daha fazla soğuyacağından dolayı, sıcaklık gövde uzunluğu arttıkça artırıldı. Daha önce belirlediğimiz hedef kristal uzunluğuna ulaşıldığında son koni aşamasına geçildi.

Son koni

Kristalin eriyikten ayrılmasında, termal şok etkisini minimize etmek için çap değeri azaltıldı. Kristal ve eriyik ve minimum temas noktasına sahipken kristal eriyikten ayrıldı ve böylece kristal büyütme aşaması tamamlanmış oldu.

Sonlandırma

Sonlanan büyütme işlemi sonrasında pota ve kristal birbirinden uzaklaştırıldı ve kademeli olarak ısıtıcı gücü sonlandırıldı. Soğutma işlemi için Ar gaz akışı düşük seviyelerde yaklaşık 3 saat devam ettirildi ve sonrasında soğumaya bırakıldı.

Soğumaya bırakılmasının yaklaşık 6 saat sonrasında kristal dışarı alındı ve dilimleme için hazırlandı.

3.1.2. Optik pencere elde edilmesi

Dilimleme

Kristaller kullanım ve analiz amaçlarına uygun bir şekilde farklı kalınlıklarda dilimlendi. Dilimleme işlemi Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan ve Resim 3.2' de gösterilen, Meyer Burger DW dilimleme sisteminde, 35 µm kalınlıklı elmas kaplamalı tel ile gerçekleştirildi. Dilimleme işleminden önce kristal külçeler epoksi yapışkan kullanılarak bir tabla üzerine sabitlendi. Bu çalışma kapsamında yapılmış olan tüm dilimleme işlemleri esnasında kesme hızı yaklaşık olarak 0,0222 mm/sn kullanılmıştır. Bu hız değerinin küçük olması, kesim sırasında kaliteli bir yüzey elde etmemiz açısından önemlidir. Telin dönme hızı ise 600 m/s olarak kullanıldı. Ayırma sabiti, kristal içerisindeki

farklı bölgelerde farklı taşıyıcı yoğunluğu oluşturduğundan dolayı, dilimler kristallerin hemen hemen aynı bölgelerinden alınmıştır.



Resim 3.2. Meyer Burger DW dilimleme sistemine ait bir resim

Taşıma ve parlatma

Dilimlenen Ge tek kristalleri cam alttaş tutucuya bağlanarak taşıma işlemi için hazır hale getirildi. Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan ve Resim 3.3'te gösterilen, Logitech LP50 taşıma ve parlatma cihazı yardımıyla malzeme yüzeyi aşındırılarak parlatılmaya hazır hale getirildi. Maksimum 70 rpm hızında dönebilen ve dökme demir bir tablaya sahip olan sistem, sadece tabla hareketi ile taşıma ve parlatma yapabilmektedir. Ayrıca parlatma işlemi için farklı poliüretan pedler ve bu pedlerin yapıştırılabileceği tablalar mevcuttur.

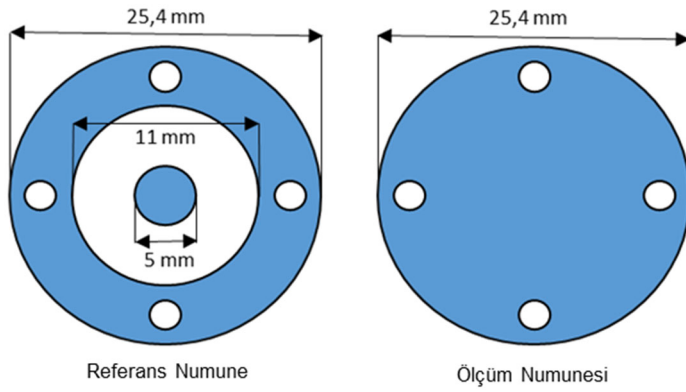


Resim 3.3. Logitech LP50 taşlama ve parlatma cihazından bir görüntü

Yapılan taşlama işlemlerinde dökme demir tabla ile sırasıyla 9 μm , 3 μm ve 1 μm Al_2O_3 parçacığı içeren solüsyon kullanıldı. Taşlama işlemlerinde tablanın dakikadaki tur sayısı (rpm) 40 - 60 tur olarak yapılmıştır. Parlatma işleminde, paslanmaz çelik plaka üzerine yapıştırılmış olan poliüretan ped ve 250 - 30 nm boyutlu çözünmüş alkali koloidal silikalı SF1 parlatma solüsyonu kullanıldı. Parlatma aşamasında tabla dönme hızı 20 – 40 rpm olarak kullanılmıştır. Temizlik işlemleri sonunda numuneler kaplamalar ve analizler için hazırlanmış oldu.

3.1.3. Metalik örgü kaplaması

Metalik örgülerin amacı yüksek EMI kalkanlama, iyi bir ısıtıcı performansı ve yüksek optik geçirgenliktir. Bu ölçütler doğrultusunda metalik örgü parametreleri olan çizgi genişliği (l) ve çizgiler arası boşluk (g) belirlendi. Bu tez çalışmasında, uygulanabilirliğin kolay olması açısından kare periyodik metalik örgü tercih edilmiştir. 8 farklı metalik örgü parametresine ve farklı optik geçirgenlik değerine sahip desenler L-Edit programında oluşturulmuş ve UNAM 'da maske yazıcı lazer yardımı ile fotolitografi maskeleri elde edilmiştir. Şekil 3. 2' de belirtilen ölçülere uygun geometride Lazer sistemi ile kesilen “Referans” ve “Ölçüm” numuneleri, fotolitografi işlemlerinin ardından kaplama işlemine hazırlanmış oldu.



Şekil 3.2. SE test cihazının numune ölçüm geometrisi ve boyutları

8 farklı periyodik kare metalik örgü tasarımlarımız ve bunlar için optik geçirgenlik (OT) değerleri Çizelge 3.2’ de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Hazırladığımız kare metalik örgü desenlerine ait g , l ve OT değerleri

Maske Numarası	$g(\mu\text{m})$	$l(\mu\text{m})$	OT
M1	525	25	0,82
M2	505	5	0,96
M3	220	20	0,68
M4	210	10	0,82
M5	110	10	0,68
M6	105	5	0,82
M7	810	10	0,95
M8	55	5	0,68

3.1.5. Fotolitografi işlemi

Numuneler aseton – alkol ile temizlendi, DI-H₂O ile durulandı ve yüksek saflıktaki azot gazı ile kurutuldu. Bu numuneler üzerine foto direnç; dönel kaplama sisteminde, 30 s süre de 3500 rpm ile homojen bir şekilde kaplandı. Sonrasında 110 °C’ de 50 s süre tavlama işlemi ile foto direnç üzerindeki çözücülerin buharlaşması ve böylece yüzeye daha iyi tutunması sağlandı. MJB-4 Karl-Süss maske hizalama sisteminde, numune ve M4 kodlu maske birbirlerine hizalandı, sert kontak altında, foto direnç kaplı yüzeye 20,5 s süre UV pozlama işlemi gerçekleştirildi.

Pozlama işleminin ardından numuneler 30 s desen geliştirme (developer) çözeltisinde bekletilerek yüzeyinde desen oluşturuldu. De-iyonize suda durulanan malzemeler kuru azot

ile kurutuldu. Desenleme işlemi sonrasında numuneler Altın (Au) kaplama için kaplama sistemine verildi.

3.1.6. İnce film kaplama

Gazi üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi' nde bulunan NVTs-500 sisteminde metalik örgü ve yansıma önleyici kaplamaları yapılmıştır. Resim 3. 4' te verilen NVTs-500 eş odaklı püskürtme sistemi, hem termal buharlaştırma hem de manyetik saçırma işlemlerinin gerçekleştirilebildiği bir sistemdir. Eş odaklı püskürtme sistemi, kutu tipi vakum kazanına sahiptir ve ardışık/eş zamanlı ısı buharlaştırma, DC/RF manyetik saçırma ayrıca fiziksel buhar biriktirme olanağı sunabilmektedir. Eş püskürtme yöntemiyle aktif ve reaktif nano boyutlu yapılar, çok katmanlı, oksitli, nitrürlü ve karbürü yapılar yapılması mümkün olmaktadır.

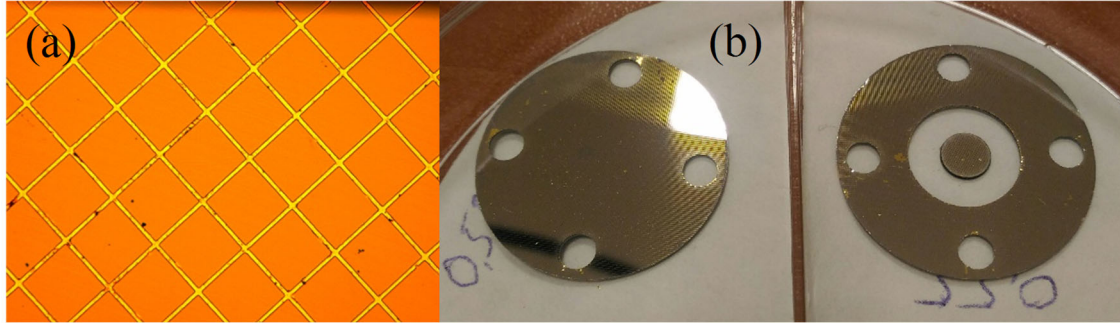


Resim 3.4. NVTs-500 eş odaklı püskürtme sistemi

Metalik örgü geometrisi oluşturmak için fotolitografi işleminden sonra Au kaplaması yapıldı. 460 nm kalınlıklı Au metalik örgü kaplaması DC magnetron eş püskürtme sistemi ile 50 W altında kaplandı.

Foto litografi işlemi ardından desen basılan numuneler Sputtering kaplama sistemine verildi. Kaplama sistemine ait veriler aşağıdadır. Oda sıcaklığında, $4,0 \times 10^{-3}$ mbar basınç altında, DC 50 W güç ile 26 dk süren kaplama işlemi sonunda 460 nm kalınlık ölçülmüştür.

Kaplama işleminin ardından aseton içerisinde ve ultrasonik banyoda bekletilen numuneler üzerinde, Au kaplı periyodik kare desen oluşmuş oldu. Ge üzerine M4 isimli maske desenleyerek oluşturulan numuneye ve mikroskop görüntüsü Resim 3. 5' te verildi.



Resim 3.5. (a) Au örgü kaplamanın mikroskop görüntüsü ve (b) Au örgü kaplanmış SE ölçüm seti

Ayrıca yansıma önleyici kaplama materyali olarak ZnSe kullanılmıştır. Yansıma önleyici kaplamalar hem Ge hem de metalik örgü kaplaması yapılmış olan Ge üzerine, her iki yüzeye de olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Ge için iki (ön ve arka yüzey) ve metalik örgü kaplaması olan Ge için iki (ön ve arka yüzey) olacak şekilde toplamda dört adet yansıma önleyici (ZnSe) kaplamasına ait bilgiler Çizelge 3.3' te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Yansıma önleyici kaplama parametreleri

Kaplama Parametreleri	Ge		Metal Örgü Kaplanmış Ge	
	Ön Yüzey	Arka Yüzey	Ön Yüzey	Arka Yüzey
P_{base} (torr)	$1,6 \times 10^{-6}$	$7,5 \times 10^{-6}$	$4,9 \times 10^{-6}$	$7,3 \times 10^{-6}$
$P_{kaplama}$ (mtorr)	10	10	10	10
Süre (dk)	100	110	130	125
T_s (°C)	Oda sıcaklığı	Oda sıcaklığı	Oda sıcaklığı	Oda sıcaklığı
Güç (W)	100	100	100	100
Mesafe (mm)	~120	~120	~120	~120
Hedeflenen kalınlık (nm)	1100	1100	1100	1100
Ölçülen kalınlık (nm)	~920	~980	~1300	~1200

3.2. Karakterizasyon Sistemleri

Czochralski tekniği ile büyütülen tek kristal Ge, dilimleme, taşlama ve parlatma işlemleri yapılarak karakterizasyon ve analizler için hazır hale getirildi. Ayrıca bazı Ge optikler üzerine metalik örgü ve yansıma önleyici kaplamalar yapılarak değişimler incelenmiştir. Analizler için hazır hale getirilen optik pencerelerin elektriksel parametreleri Hall etkisi

ölçüm sistemi ve yapısal özelliği X-ışını kırınımı tekniği ile belirlendi. Pencerelelerin IR optik geçirgenliği FTIR spektroskopisi metodu, EMI kalkanlama etkinliği ASTM D 4935-99 standartına göre, eş eksenli SE ölçüm aparatı ve VektorStar MS4644A vektör ağ analizör (VNA) sistemi kullanılarak belirlendi. Ge optik pencereler için ısıtıcı davranışı, alınan kontaklar üzerinden güç kaynağı ile gerilim uygulayarak, yüzeyden temas eden sıcaklık ölçer ile zamana bağlı sıcaklık ölçümleri alınarak belirlendi. Ayrıca, sabit gerilim altında zamana bağlı elde edilen sıcaklık değerleri sayesinde, yine aynı şartlar tekrarlanarak sıcaklık bağımlı IR optik geçirgenlik ölçümleri gerçekleştirildi.

3.2.1. Hall etkisi ölçüm sistemi (HMS)

Yarıiletken malzemelerin, taşıyıcı yoğunluğu, mobilite ve öz direnç gibi elektriksel parametreleri deneysel olarak Hall etkisi ölçüm sisteminde belirlenebilmektedir. Ölçüm için, numune yüzeyinden alınan kontakların ohmik karakter göstermesi, numunenin homojenliği ve kalınlığının tam olarak bilinmesi Hall etkisi ölçümleri için gerekli şartlardandır. Bu ölçümün alınması için kullanılacak düzeneğin ise numune sıcaklığını, manyetik alan şiddetini, elektrik akımını ve voltajını doğru bir şekilde ölçebilecek yeterlilikte olması gerekmektedir. [18].

Sisteme ait kontrol ünitesi sayesinde malzemeye uygulanacak olan sabit akım, manyetik alan ve sıcaklık değerleri kontrol edilebilmektedir. Kontrol sisteminin bağlı olduğu bilgisayar, ölçüm sırasındaki verileri alarak programa aktarır ve bu program sayesinde Van der Pauw ve Hall ölçüm etkisi tekniklerini kullanarak gerekli olan öz direnç (ρ), Hall taşıyıcı yoğunluğu (n_H), mobilite (μ_H) ve Hall katsayısı (R_H) değerlerinin bulunmasını sağlar.

Bu tez çalışmasında kullanılan Lakeshore 7700 serisi Hall ölçüm sistemi Resim 3.6'da verildi.



Resim 3.6. Lakeshore 7700 serisi Yüksek Empedans Hall etkisi ölçüm sistemi

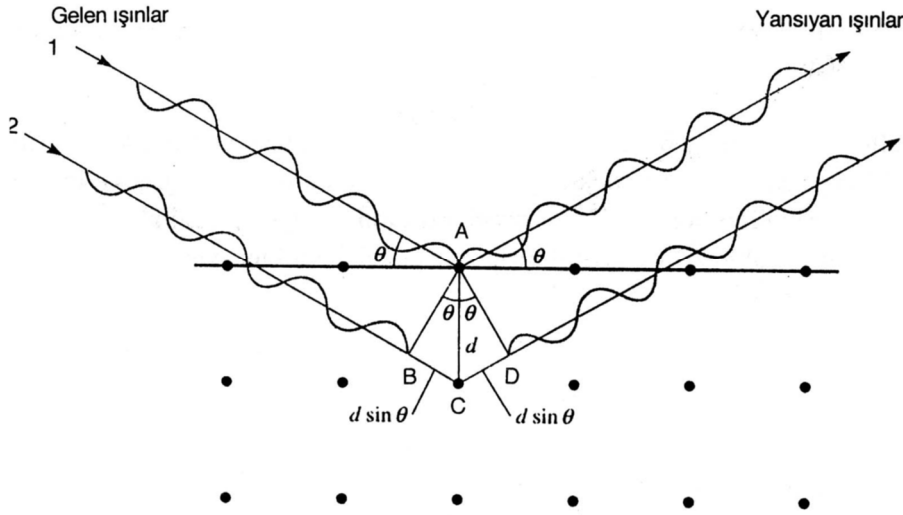
Bu tez çalışmasında üretilen kristallerden alınan dilimler için oda sıcaklığında öz direnç ölçümleri gerçekleştirildi. Ayrıca metalik örgü kaplaması için numune yüzeyindeki köşe noktalardan alınan kontaklar sayesinde elektriksel yüzey direnci belirlendi. Bu ölçüm tekniğinde kullanılan tüm numuneler $1 \times 1 \text{ cm}^2$ boyutlu hazırlandı. ZnSe yansıma önleyici katmanın öz direnç değeri, cihazın tolerans aralığının ($\sim 10^{-5}$ - $10^6 \Omega$) üzerinde olduğundan dolayı öz direnç ölçümleri gerçekleştirilemedi.

3.2.2. X-ışını kırınım sistemi

X-ışınları düşük dalga boylarına ($0,1$ - 100 Å) dolayısıyla yüksek bir enerjiye sahiptir. Bu dalga boyu aralığı yaklaşık olarak katılardaki atomlar arası mesafeyle aynı olduğundan, kristalin atomik yapısı, oluşacak X-ışını kırınım deseni ile anlaşılabilir.

X-ışınları malzemelerin tanımlanmasını, yapısal analizlerini ve karakterize edilmesini sağlayan temel yöntemlerden birisidir. Yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınımı (HRXRD), ince filmlerin ve katmanlı yapıların karakterizasyonu için de yaygın olarak kullanılır. HRXRD’ de kullanılan kristal monokromatör (örneğin Ge(002)) sayesinde X -ışınları spektrumunda bulunan $K\alpha_1$ ışınımı, $K\alpha_2$ ve $K\beta_x$ ışınımından ayrılır. Bu şekilde çoklu katman yapılarda ince film katmanların yoğunluk farkına göre $K\alpha_1$ ışınımı yutularak kırınımına uğrar. Klasik X-ışını toz kırınım sisteminde ise toz kristaller tarafından $K\alpha_1$ ve $K\alpha_2$ ışınları kırınımına uğratılır. Bu iki ışın arasındaki şiddet farkı sebebiyle numune yapısının

belirlenmesinde $K\alpha_1$ ışını yeterlidir. Malzeme karakterize etmede kullanılan HRXRD metoduyla birim hücre şekli ve simetrisi tayin edilir. Çok katmanlı yapıların ölçümlerinde ince filmde gelen ana kırınım piki çevresinde uydu pikleri oluşur. Bu elde edilen bilgiler incelenerek, numuneye ait kristal tabakanın kalınlığı, kimyasal bileşenleri, örgü uyumsuzluğu ve örgü kusurları gibi özellikler de belirlenebilir.



Şekil 3.3. X-ışınlarının kristal içindeki atomlardan veya iyonlardan saçılması [42]

X ışını analizleri Bragg Kanunu ile belirlenir. Bragg kanunu; farklı atomik düzlemlerden saçılan ışınların yapıcı girişim oluşturarak birbirlerini kuvvetlendirmesi için, farklı düzlemlerden saçılan ışınlar arasındaki yol farkının kullanılan ışının dalga boyunun tam katlarına eşit olması gerekliliği ile ifade edilir. Gelen ışının dalga boyu λ , atom tabakaları arası mesafe d , yansıma açısı θ olmak üzere Bragg kanunu;

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (3.1)$$

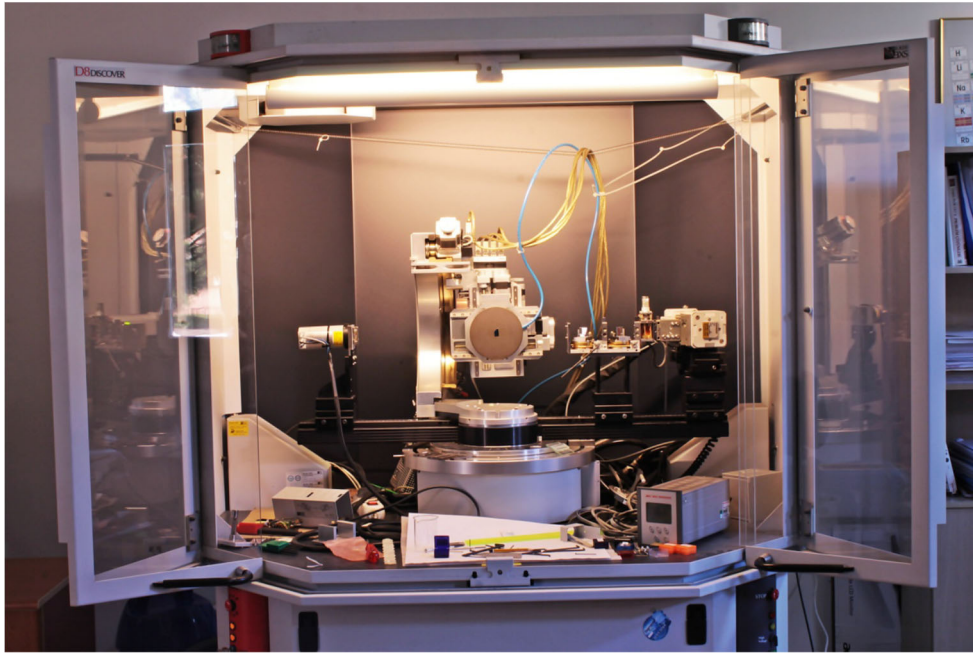
şeklinde ifade edilir. Yani, bir kristale gönderilen X-ışınları kristalden sadece, gelen ışının

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{2d} \quad (3.2)$$

eşitliğini sağlamasıyla yapıcı girişim oluşabilir. Diğer tüm açılarda ışını yok edici etkiler oluşur [42]. Ayrıca kristal kalitesini belirleyen dislokasyon yoğunluğu, mikro gerilmeler ve

parçacık boyutu gibi parametreler pik yarı genişliği (FWHM) değerleri kullanılarak belirlenebilir.

Bu çalışmada CZ tekniği ile büyütülen ve optik pencere haline getirilen numuneler, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan ve görüntüsü Resim 3.7’ de verilen yüksek çözünürlüklü Bruker D8 Discover XRD cihazı kullanıldı. Cihaz monokromatör olarak Ge (022) ve X- ışını kaynağı olarak da KPLCu2 α ’ ya sahiptir.



Resim 3.7. Bruker D8 Discover XRD cihazından bir görüntü

Cihaz ile alınan ölçümlerde, büyütülen Ge kristalinin yönelimi, tek kristal mi yoksa çoklu-kristal olarak mı kristalleştiğini belirlenmesi amaçlandı. Çizelge 1. 4’ te cihaza ait teknik özellikler verilmiştir.

Çizelge 3.4. Bruker D8 Discover XRD cihazının teknik özellikleri

Difraktometre çemberi	Bruker axs D8
Jeneratör gerilimi	40 kV
Jeneratör akımı	40 mA
Radyasyon	Cu K α_1
Monokromatör tipi	Jhannson
Monokromatör malzemesi	Ge(022)
Odak	Line odak
K α_1 dalga boyu	1.54 Å

Ayrıca yansıma önleyici (ZnSe) kaplamalarını Ge ve SLG üzerine yaptığımız çalışmamız için APD 2000 PRO XRD toz kırınım cihazı kullanılmıştır.

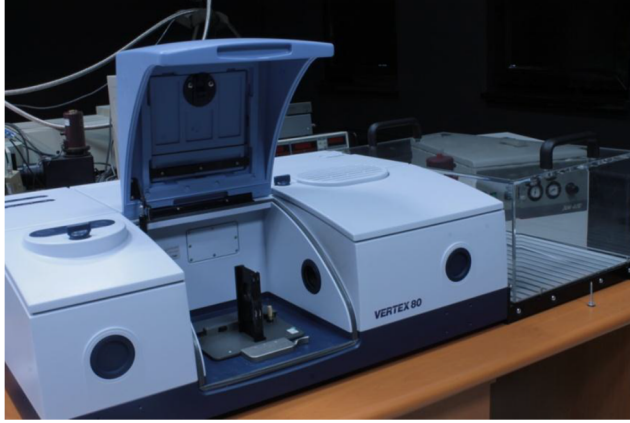
3.2.3. FTIR spektrometre

FTIR (Fourier dönüşümlü kızılötesi) spektroskopi, kimyasal bileşiklerin analiz ve sentezleme aşamalarında organik kimyada kullanılan pratik ve yaygın bir tekniktir. Bu yöntemde analiz edilen moleküle ait bir titreşimin gözlenebilmesi için titreşim enerji seviyeleri arasındaki geçişlerin bazı geçiş kurallarını sağlanmasını gerektirir. Kızılötesi spektrum yaklaşımı klasik kuram ve kuantum kuramına göre incelenir [43].

Klasik kurama göre, titreşen bir sistemin elektrik dipol momenti ışıma yayınlatabilir. Bir molekülün kızılötesi ışımayı soğurabilmesi, molekülün dipol momentinde net bir değişime bağlıdır. Kuantum kuramına göre, bir molekülün kızılötesi ışımasını soğurmasıyla temel durum ve uyarılmış durumları arasında geçiş meydana gelir. Bu işlem sonunda yayımlanan kızılötesi ışımanın bir titreşime ait spektrum bandı verebilmesi molekül dipol momentindeki net bir değişime bağlıdır [43].

Kızılötesi spektroskopide malzemeye gönderilen IR radyasyonun bir kısmı malzeme tarafından soğurulur ve bir kısmı ise malzemeden direkt olarak geçer. Sonuçta elde edilen spektrum, malzeme molekülünün parmak izi gibidir ve moleküler soğurmayı, geçirgenliği gösterir. Bu spektrum malzemeye özeldir yani farklı malzemeler farklı IR spektrumuna sahiptir [32].

Ge optik pencerelerin kızılötesi bölgede optik geçirgenliğini belirlemek için Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan tam dijital Fourier dönüşümlü kızılötesi Vertex 80 (Resim 3. 8) spektroskopi cihazı kullanılmıştır.



Resim 3.8. Vertex 80 spektroskopi cihazından bir görüntü

Sistem $15\,500 - 350\text{ cm}^{-1}$ aralığında çalışmaktadır ve istenirse $50.000-10\text{ cm}^{-1}$ çalışma aralığına kadar genişletilebilir. Ayrıca sistemin hızlı kinetik tarama özelliği mevcuttur ve 16 cm^{-1} optik çözünürlükte saniyede en az 65 spektrum alabilmektedir. Sistemin spektral çözünürlüğü katı, sıvı ve gaz numunelere uygundur. Cihaz, uzun ömürlü, hava soğutmalı ve yüksek enerjili DLTGS detektör, geniş bantlı MCT detektör ve NIR bölgede çalışması için bir InGaAs detektöre sahiptir.

3.2.4. EMI kalkanlama etkinliği ölçüm sistemi

EMI kalkanlama etkinliği ölçümleri, Aselsan A.Ş. tarafından 1 inç (25,4 mm) çaplı numunelerin SE değerini belirlemek için geliştirilen eş eksenli kalkanlama etkinliği (SE) test aparatı (Resim 3.9) ve VektorStar MS4644A vektör ağ analizörü (VNA) kullanılarak gerçekleştirildi. Test aparatı ASTM D4935-99 standartına göre geliştirilmiş olup uzak alan yani düzlem dalga SE değerini belirlemede kullanılmaktadır. Ölçümler 100 kHz ve 18 GHz aralığında alınmıştır.



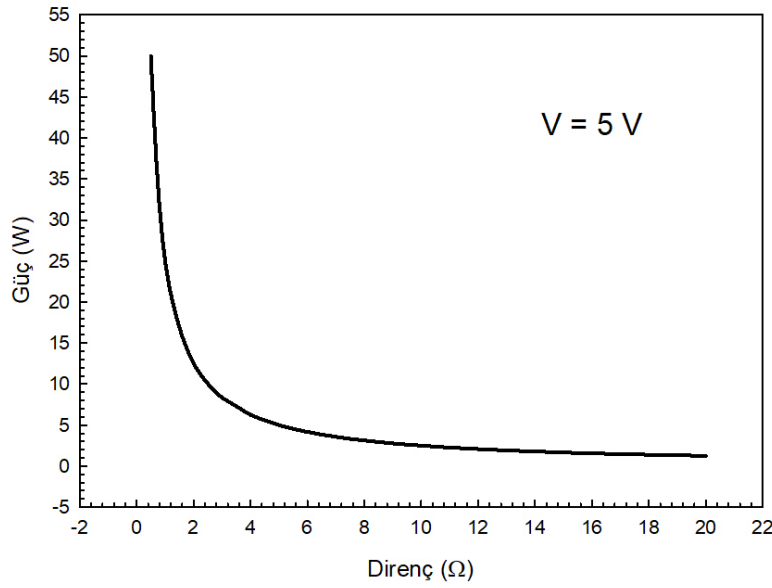
Resim 3. 9. 1 inç çaplı eş eksenli SE test aparatı.

Ölçüm geometrisinden ve boyutlarından dolayı Eş 2.15 ile hesaplanan sistemin üst kesim frekansı yaklaşık 12 GHz' dir. Referans ve ölçüm numunelerinin elektriksel ince ve uygun geometride olması gerekmektedir. Ayrıca referans ve ölçüm numuneleri homojen ve düzlemsel olmalıdır.

3.2.5. Isıtıcı davranışını ölçümleri

Şeffaf ısıtıcılar birçok farklı malzeme ve kaplama ile sağlanabilmektedir. Bunların başında metal oksit ince filmler, karbon nano temelli yapılar, metal nano tel yapılar, metalik örgüler ve hibrit elektrot bazlı ısıtıcılar gelmektedir [16]. Ancak bu ısıtıcılardan birçoğu görünür bölge spektrumunda yüksek optik geçirgenlik elde etmektedir. Kızılötesi bölgede ise yüksek optik geçirgenlikli şeffaf ısıtıcı, metalik örgülerin optimizasyonu ile başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Çalışmamızda kızılötesi optik pencere üzerinde yüksek optik geçirgenliğe sahip (>%80), EMI kalkanlayıcı olarak amaçlanan metalik örgünün, ısıtıcı davranışı değerlendirildi.

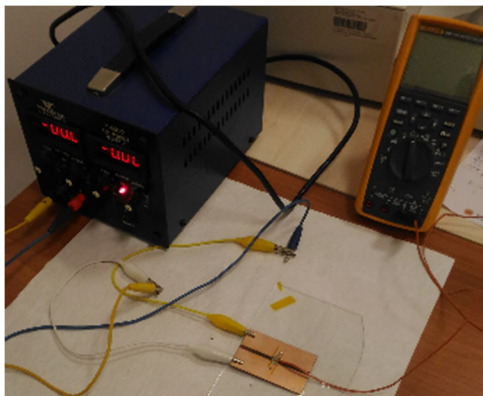
Isıtıcının düşük voltaj değerlerinde yüksek sıcaklığa çıkması ve hızlı sıcaklık değişimi gerçekleştirebilmesi istenen özelliklerindendir. Isıtıcı performansı tüketilen güç değerine bağlı olacaktır. Bilindiği üzere güç (P), akım-gerilim ve dirence bağlıdır ($P=V^2/R=I^2R$). Bir ısıtıcının tasarımı aşamasında, çalışacağı yaklaşık gerilim değeri ve çıkması istenen maksimum sıcaklık değeri dikkate alınır. Burada belirlenecek en önemli parametre ısıtıcının direncidir. Çünkü farklı direnç değerlerine uygulanan sabit gerilim farklı güç değerlerine neden olmaktadır. Şekil 3.4' te, sabit gerilim (5 V) altında farklı direnç değerleri (0.5 - 20 Ω) için oluşacak güç değişimine ait bir grafik verilmiştir.



Şekil 3. 4. 5 V altında farklı direnç değerleri (0,5 - 20 Ω) için oluşacak güç değişimi

$P=I^2R$ ifadesine göre farklı direnç değerleri için uyguladığımız sabit gerilim altında elde edeceğimiz güç değerleri Şekil 3. 4' deki gibidir. Düşük direnç değerlerinde ısıtıcı üzerinden daha fazla akım geçerek, ısıya dönüşen enerji fazla olacaktır. Bu nedenle metalik örgünün düşük direnç değerinde olması ısıtıcı performansını artıracaktır.

Isıtıcı davranışını belirlemek için, Resim 3.10' da gösterildiği gibi güç kaynağı ve sıcaklık ölçer kullanıldı. Numuneler optik geçirgenlik ölçümlerinde de kullanılmak üzere özel hazırlanan optik açıklıklı numune tutucu üzerine sabitlendi ve alınan kontaklar ile elektriksel bağlantı sağlandı. Sabit gerilim güç kaynağı tarafından uygulandı ve numunenin sıcaklık değişimi yüzeyden temas eden bir sıcaklık ölçer ile zamana bağlı olarak belirlendi.



Resim 3.10. Isıtıcı davranışını belirlediğimiz test düzeneği

Ayrıca bu düzenek, optik açıklığa sahip olan numune tutucu sayesinde sıcaklık bağımlı kızılötesi optik geçirgenlik ölçümleri için de kullanıldı. FTIR ölçümleri sırasında, daha önceden ısıtıcı davranışını belirlemede elde edilen verilerin (gerilim-zaman-sıcaklık) tekrarlanmasıyla, yeniden sıcaklık ölçümüne gerek kalmadan sıcaklık bağımlı optik geçirgenlik ölçümleri gerçekleştirildi.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında Ge kristallerin büyütme tasarımı, büyütülen kristallerin optik pencere haline getirilmesi, üretilen optik pencerelerin yapısal, optik, elektriksel özelliklerinin incelenmesi ve EMI performansının değerlendirilmesi yapıldı. Ayrıca çeşitli metalik örgü tasarımları ve Ge optik pencere üzerine uygulaması yapıldı. Metalik örgü tasarımının optik ve elektriksel özellikleri değerlendirilmiştir. Metalik örgü sayesinde optik geçirgenlikteki değişim ve EMI kalkanlama davranışı belirlendi. Hem Ge optik pencere hem de metalik örgü kaplı Ge optik pencere üzerine yansıma önleyici kaplama yapılarak kızılötesi optik geçirgenlikteki değişim incelendi. Ayrıca metalik örgü kaplı Ge numunelerinin buz-buğu önleyici amacıyla ısıtıcı davranışı belirlenmeye çalışıldı.

Numuneler, alttaş, kalınlık ve üzerine yapılan kaplamalara göre adlandırılmıştır. Bu adlandırma işlemine ait Çizelge 4.1’ de gösterildiği gibi yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Oluşturulan numuneler için veri ve adlandırma tablosu

Numune Kodu	Alttaş	Kalınlık (mm)	Metalik Örgü	Yansıma Önleyici
N1	Ge (GCZ17)	3,5	×	×
N2	Ge (GCZ18)	5,5	×	×
N3	Ge (GCZ18)	0,5	×	×
N4	Ge (GCZ18)	0,5	✓	×
N5	Ge (GCZ18)	0,5	×	✓
N6	Ge (GCZ18)	0,5	✓	✓
N7	Ge (GCZ19)	3,5	×	×
N8	SLG	2	×	✓

4.1. Profilometre Kalınlık Ölçümleri

Ge ve SLG üzerine farklı amaçlar doğrultusunda farklı kaplamalar yapıldı. Öncelikle Ge üzerine yapılan 10 μm çizgi genişlikli ve 210 μm çizgiler arası boşluğa sahip Au örgüye ait kalınlık yaklaşık 460 nm ölçülmüştür ve profilometre sonucu Resim 4. 1’de ki gibidir. Profilometre sisteminde yaklaşık 12 μm uca sahip iğne olmasından dolayı, çizgi genişliği olan konumlarda ani pikler gözlenmiştir.



Resim 4.1. Au örgüye ait kalınlık profil ölçüm görseli

Ge üzerine yansıma önleyici kaplamalar Ge numunenin her iki yüzeyine de ayrı ayrı kaplanmıştır. Ge yüzeyine yapılan ilk kaplama sonrasında kalınlık ve FTIR geçirgenlik ölçümleri alınmış ve sonrasında diğer yüzey kaplama işlemine geçilmiştir. Ge pencere üzerine yapılan yansıma önleyici kaplamalar için ön ve arka yüzeyden alınan kalınlık ölçümleri sırasıyla yaklaşık 980 ve 920 nm olarak belirlenmiştir. Ayrıca Au örgü kaplı Ge için ön ve arka yüzey yansıma önleyici kalınlık ölçümleri sırasıyla yaklaşık 1300 ve 1200 nm olarak belirlendi. Son olarak SLG üzerine yapılan ZnSe kaplama kalınlığı yaklaşık 1200 nm olarak belirlenmiştir.

4.2. Ge Kristallerin Elektriksel Karakterizasyonu

Hazırlanan numunelerin oda sıcaklığında (~300 K), Van Der Pauw tekniği kullanılarak öz direnç ölçümleri yapıldı. Ölçümler sonucunda numunelere ait öz direnç ve elektriksel yüzey direnci Çizelge 4.2’ de verildi.

Çizelge 4.2. Numunelere ait öz direnç ve elektriksel yüzey dirençleri

Numune	Kalınlık (cm)	Öz direnç ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Elektriksel Yüzey Direnci ($\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$)
N1	0,35	42,1	120,3
N2	0,55	41,6	75,6
N3	0,05	41,6	832,0
N4	$4,6 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-6}$	1,13
N7	0,35	40,0	114,3

Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere, metalik örgü kaplaması yapıldığında elektriksel yüzey direnci ciddi derecede azaldı. Düşük dirençli tabakadan yansıma kaybını artırarak EMI kalkanlama performansını iyileştirmek hedeflendi. Elektriksel yüzey direnci (R_s);

$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (4.1)$$

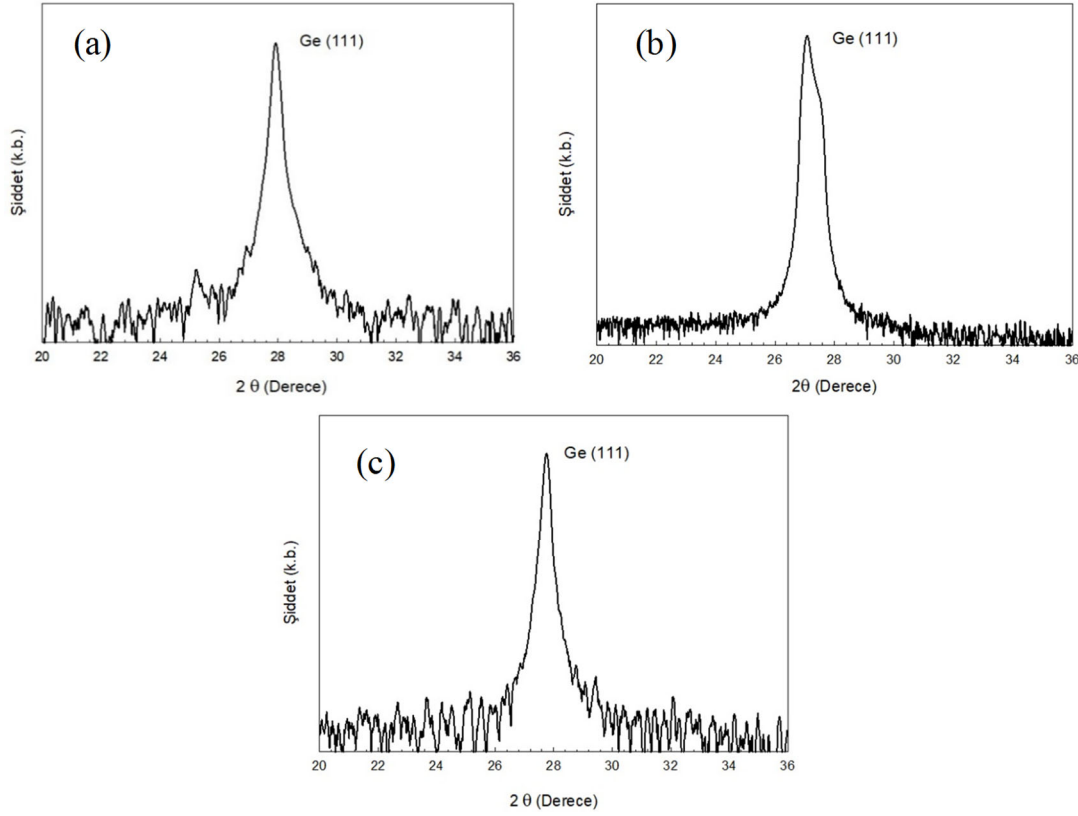
ile ifade edilir. Metalik örgü gibi sürekliliğe olmayıp, g ve l parametrelerine sahip kaplamalar için etkin elektriksel yüzey direnci (R_{eff}) [31]:

$$R_{eff} = \frac{g}{l} R_s \quad (4.2)$$

ile ifade edilir. Eş. 4.2’ ye göre Au örgünün olmasını beklediğimiz R_{eff} değeri $1,11 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ ’ dir ($g=210 \mu\text{m}$, $l=10 \mu\text{m}$, $\rho_{Au}=2,44 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ve $t=4,6 \times 10^{-5} \text{ cm}$). Ölçüm sonucumuz olan $1,13 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ ’ ye oldukça yakın bir değer olarak elde edilmiştir.

4.3. X-Işını Kırınım Sonuçları

CZ tekniği ile (111) yöneliminde büyütülen Ge kristallerine ait XRD ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir. Kristallerin (111) yöneliminde tek kristal yapıda olduğu gözlemlendi. Büyütülen kristal külçelerden dilimler, kristallerin hemen hemen aynı bölgelerinden alındı. Taşlama ve parlatma işlemlerinden sonra optik pencere haline gelen dilimler yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınım sisteminde ölçülmüştür.



Şekil 4.1. (a) N1, (b) N2 ve (c) N3 numunelerine ait X-ışını kırınım desenleri

Sb katkılı Ge tek kristaller için HRXRD ölçümlerinden elde edilen Şiddet- 2θ X-ışını kırınım desenleri Şekil 4.1’ de verildi. Şekiller incelendiğinde Ge tek kristallerin (111) yöneliminde büyüdüğü görüldü.

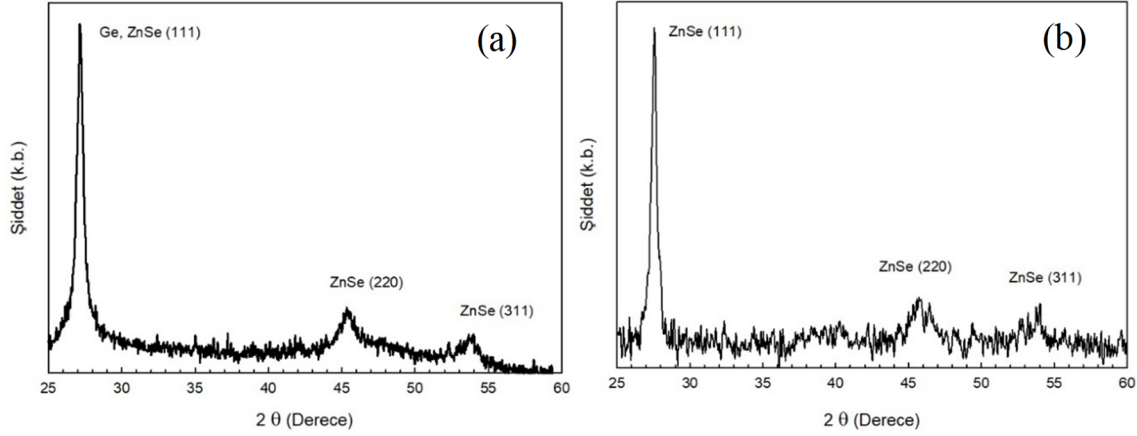
Çizelge 4.3. Büyütülen numunelere ait XRD verisi analizleri

Numune	Pik Pozisyonu	Örgü Sabiti (Å)	Yönelim	FWHM	Dislokasyon Yoğunluğu ($\times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$)	Parçacık Boyutu (Å)	Mikro Gerilmeler ($\times 10^{-3}$)
N1	27,92°	5,53	(111)	0,215°	0,694	379,44	1,683
N2	27,28°	5,66	(111)	0,223°	0,747	365,88	1,756
N7	27,74°	5,57	(111)	0,226°	0,762	362,30	1,803

Büyütülen Ge (111) tek kristallerinin XRD kırınım deseninden (111) yönelimine ait pik açısı değerleri, literatür değeri (27,284°) ile uyumlu olduğu görüldü. Ayrıca tek kristaller için hesaplanan örgü parametreleri, Çizelge 4.3’ te gösterildiği gibi bulundu. Bu değerlerin de literatür değeri (5,66 Å) ile uyumlu olduğu görüldü [44]. FWHM değerinin katkı miktarının artmasıyla arttığı ve buna bağlı olarak dislokasyon yoğunluğunun da arttığı gözlemlendi.

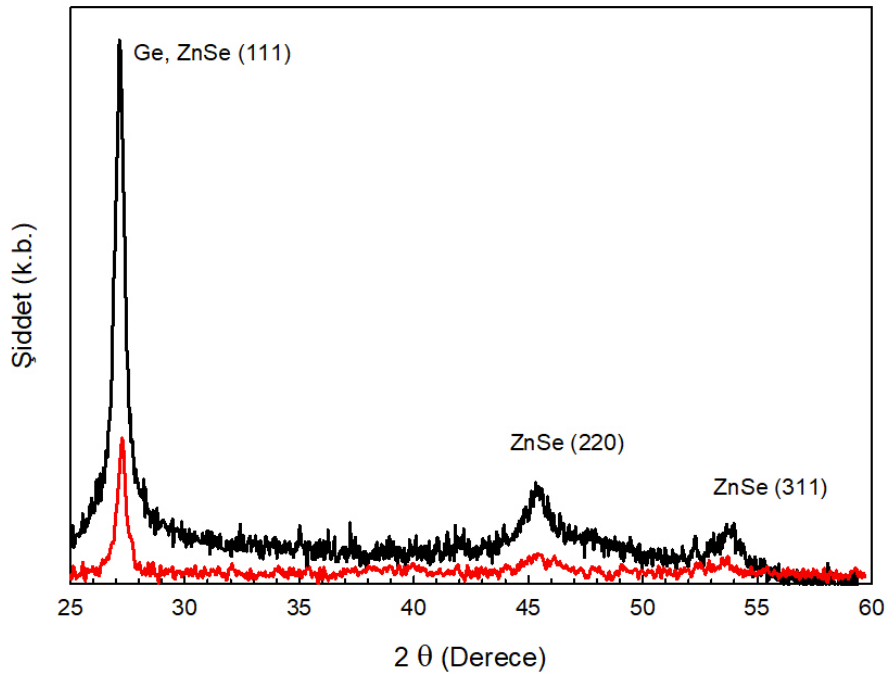
Yansıma önleyici katman kalınlığı, 10,6 μm ’ de minimum yansıma olacak şekilde, Eş. 4.3’ e göre belirlendi. Bunun için yaklaşık kaplama kalınlığı 1100 nm olarak hedeflenen ZnSe,

hem Ge optiklerin üzerine (N5) hem de SLG üzerine (N8) aynı şartlarda kaplandı. Oda sıcaklığında yapılan kaplama işlemine daha sonra vakum altında 300 °C’ de 1 saat süreyle ısıtıl işlem uygulandı. Tüm bu işlemlerin ardından, yansıma önleyicilere ait X-ışını kırınım deseni Şekil 4.2’ de verildi.



Şekil 4.2. (a) N5 ve (b) N8 için X-ışını kırınım desenleri

ZnSe’ ye ait (220) ve (311) pikleri Şekil 4. 2 (a, b)’ de net bir şekilde belirmiştir. N8 için olan ölçümde ZnSe’ nin (111) yöneliminde kristalleştiği sonucuna ulaşıldı. Ayrıca Ge üzerine yapılan kaplamaya ait ZnSe (220) ve (311) piklerinin daha belirgin olması Ge üzerine yapılan kaplamanın daha iyi kristalize olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.3. N5 ve N8 X-ışını kırınım deseninin birlikte gösterimi

Şekil 4. 3’de ki gibi N5 ve N8 X-ışını ölçümlerini aynı grafikte değerlendirdiğimizde Ge (111) ve ZnSe (111) piklerinin çakışık olduğu gözlemlendi. Ge (111) ve ZnSe (111) yönelim piklerinin yaklaşık aynı pik pozisyonunda ($27,28^\circ$ ve $27,22^\circ$) olmasından dolayı, N5 numunesi için yaklaşık $27,2^\circ$ de beliren pikin hem Ge hem de ZnSe’ e ait olduğu değerlendirildi. N8 için X-ışını kırınımı ölçümünden belirlenen ZnSe (111) kristal örgü parametreleri Çizelge 4.4’ te sunuldu.

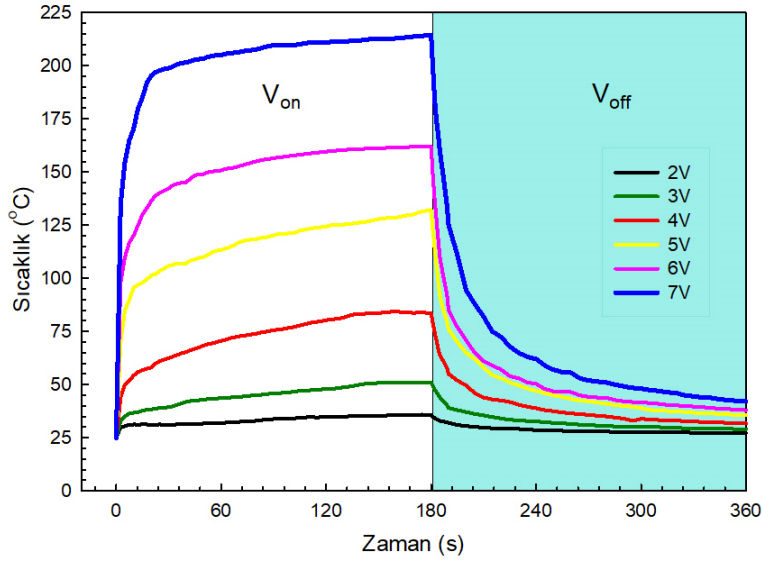
Çizelge 4.4. ZnSe (111) kristal örgü parametreleri

λ (Å)	h	k	l	2- θ ($^\circ$)	d (Å)	a (Å)	Parçacık Boyutu (nm)	Dislokasyon ($\times 10^{11}$ cm $^{-2}$)	Yoğunluğu	Mikro ($\times 10^{-3}$)	Gerilmeler
1,54	1	1	1	27,6	3,23	5,59	25,56	1,53		2,53	

4.4. Isıtıcı Davranışı Ölçümleri

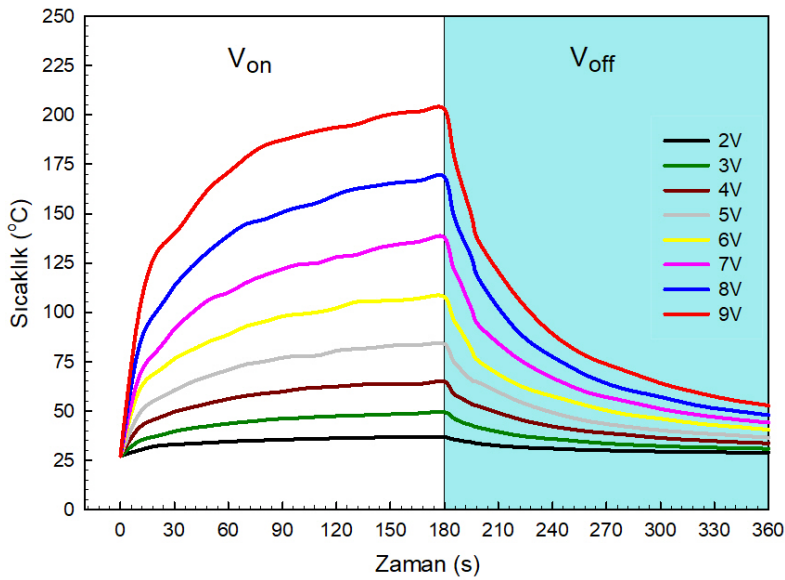
Metalik örgünün, örgü parametreleri ve kaplama kalınlığı ile elde ettiğimiz direnç değeri $1,13 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ ’ dir. Isıtıcının düşük dirençli olması sayesinde, düşük gerilim değerlerinde bile ısıtıcının tepki vermesi sağlanmıştır. Ancak metalik örgü ile birlikte alınan kontaklardan da kayıp oluşabileceği bu sayede devre direncinin artacağı bir gerçektir. Isıtıcı devreye DC güç kaynağı bağlantısı yapıldığında, sistem üzerinden geçen akım eşdeğer dirence göre belirlenecek ve ısıtıcının performansını etkileyecektir. Bundan dolayı ısıtıcı davranışını belirlediğimiz tüm numuneler için özdeş kontaklar alındı.

Çalışmamızda ısıtıcı davranışı, kontaklardan gerilim uygulayarak yüzeyden temas eden sıcaklık ölçer ile belirlendi. Ölçümler ortam sıcaklığı yaklaşık 25°C ’ de iken, farklı gerilim değerlerinde zamana bağlı olarak alındı. Ölçümler 10 s adımlar ile 180 s boyunca gerilim uygulanarak ve 10 s adımlar da 180 s boyunca gerilim uygulanmadan alınmıştır. Bu sayede zamana bağlı sıcaklık değişimi izlenmiş oldu.



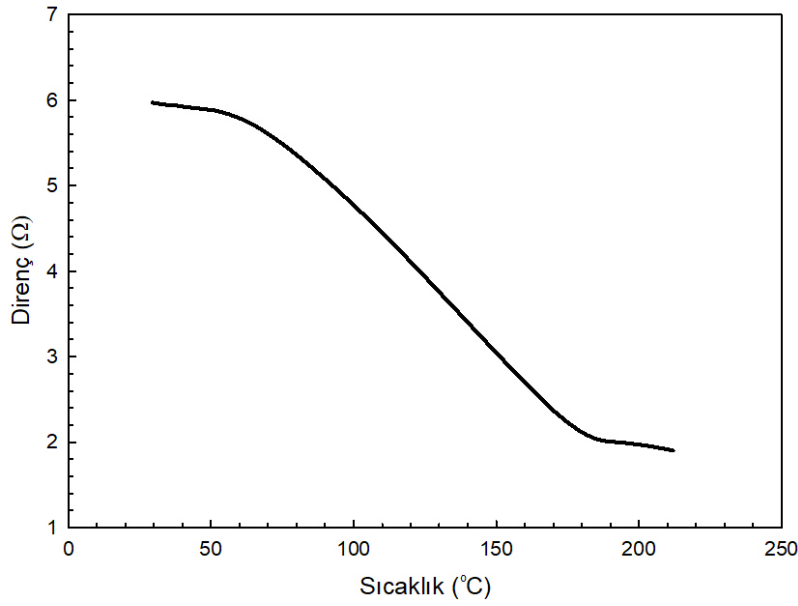
Şekil 4.4. N4 numunesinin farklı gerilim değerleri altında zamana bağlı sıcaklık değişimi

N4 numunesinin ısıtıcı davranışı Şekil 4. 4' de sunulmuştur. İlk 20 s boyunca sıcaklık değişiminin hızlı bir şekilde gerçekleştiği gözlemlendi. 30 s ve sonrasında sıcaklık değişim hızının oldukça yavaş olduğu belirlendi. Bu şekilde hızlı yanıt alabilmek ciddi bir avantajdır.



Şekil 4.5. N6 numunesinin farklı gerilim değerleri altında zamana bağlı sıcaklık değişimi

N6' ün ısıtıcı davranışı Şekil 4. 5'deki gibidir. N6'nın sıcaklık değişim hızının N4 numunesine göre daha yavaş olduğu gözlemlendi. Bu durumun, numune boyutlarındaki farktan ve yansıma önleyici katman olan ZnSe tabakasının ısı yalıtıcı olarak davranmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

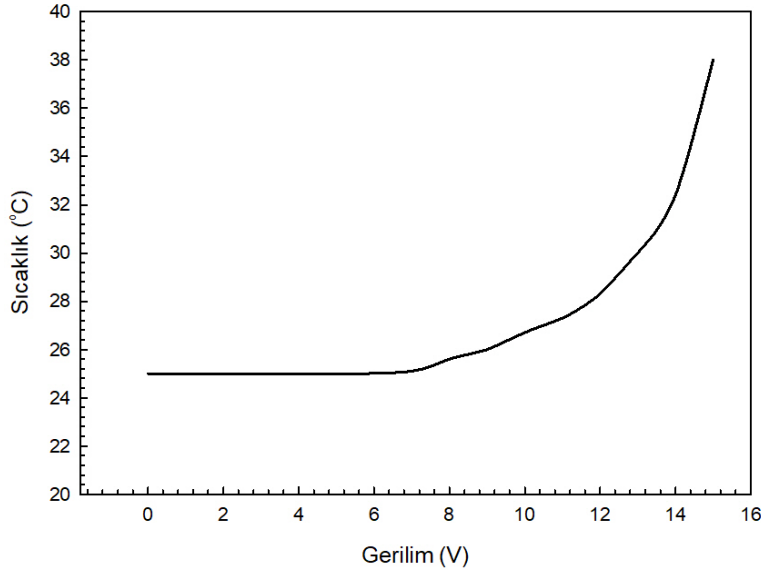


Şekil 4.6. N4 ısıtıcı davranışı ölçümü sırasında sıcaklığa bağlı direnç değişimi

Ayrıca ısıtıcı davranışı ölçümlerinde, sabit gerilim uygulanıyorken ısıtıcı devresinde direncin zamanla değiştiği gözlemlendi. Şekil 4. 6' da N4 numunesi için sıcaklığa bağlı direnç değişimi verilmiştir. Yarıiletken olan Ge optik pencere, üzerindeki metalik örgü sayesinde özellikle sıcaklığın artmasıyla (yaklaşık 50 °C ve üzeri sıcaklıklarda) elektriksel iletme katılıyor ve Ge üzerinden de akım geçerek ısıtıcı olarak davranmaya başlıyor. Bu davranış Ge 'un yarıiletken doğasından kaynaklanmaktadır. Yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğunun sıcaklık bağımlı ifadesi;

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{E_G}{2kT}}$$

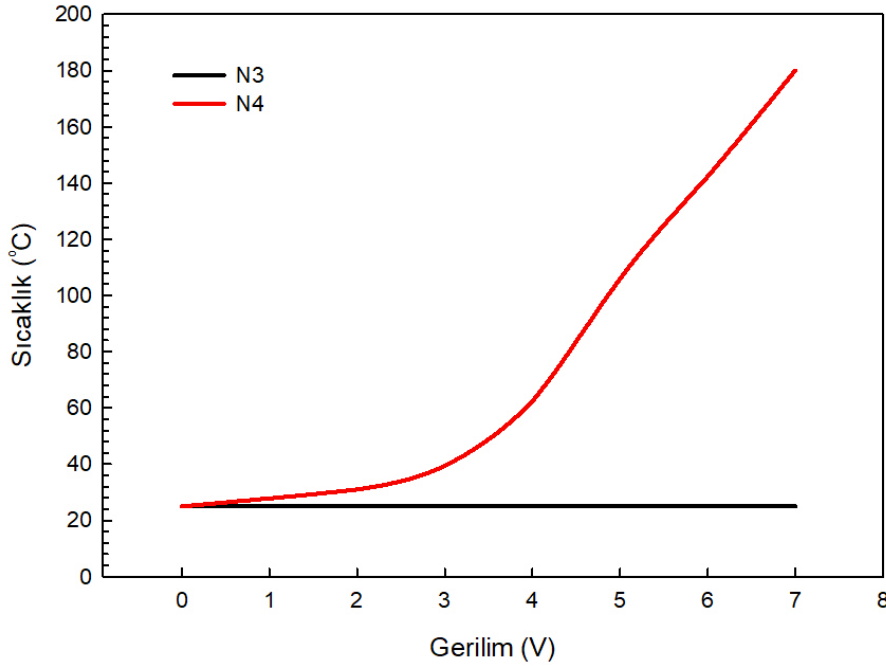
şeklindedir [45]. Burada T sıcaklık, k Boltzmann sabiti, E_G yasak enerji aralığı, N_C elektron ve N_V ise deşik yoğunluğudur. Sıcaklığın artmasıyla taşıyıcı sayısı artacaktır ve bu sayede malzemenin iletkenliği artacaktır. Bu davranış FTIR sıcaklık bağımlı optik geçirgenlik sonuçlarında, sıcaklığın artmasıyla soğurma kenarının daha düşük enerjilere kayması ve optik geçirgenlik kaybı şeklinde belirlemektedir.



Şekil 4.7. N3 numunesinin ısıtıcı davranışı

Ayrıca Şekil 4. 7’ de görüleceği üzere metalik örgü kaplaması bulunmayan ve N4 numunesi ile aynı boyutta olan N3 numunesi için farklı gerilim değerleri altında ısıtıcı davranışını belirlenmeye çalışıldı. Bu ölçümde, metalik örgülerde olduğu gibi kontaklar alındı. Her bir gerilim değerinde bir süre (~ 30 s) beklenerek gerilim değeri kademeli olarak artırıldı. Yaklaşık 25°C ortamında güç kaynağı ile Ge üzerine 7 V ’ a kadar gerilim uygulamamıza rağmen herhangi bir sıcaklık değişimi gözlenemedi. 7 V değerinden sonra 1 V ’ luk adımlarla gerilim değeri artırıldı ve 15 V değerinde $0,04\text{ A}$ akım çekmeye başlayan Ge pencere yaklaşık 38°C ’ye ulaştı. Sıcaklık ve gerilim etkisiyle iletkenlik kazanmaya başlayan Ge’nin sıcaklık değerinde ani bir artış gözlemlendi. Bu durum, 15 V gerilim uygulanıyorken kısa süre içinde yaklaşık 100°C ’ye kadar ulaşmasına neden oldu.

N3 ve N4 için farklı gerilim değerlerinde ulaşılan sıcaklık değerlerinin kıyaslaması Şekil 4. 8’ de verilmiştir. Bu sonuca göre, metalik örgülerin çok iyi derecede performans sergilediği, düşük gerilim değerlerinde bile ısıtıcı olarak davrandığı ve kontrollü bir şekilde sıcaklık değişimi sağladığı gözlemlendi.

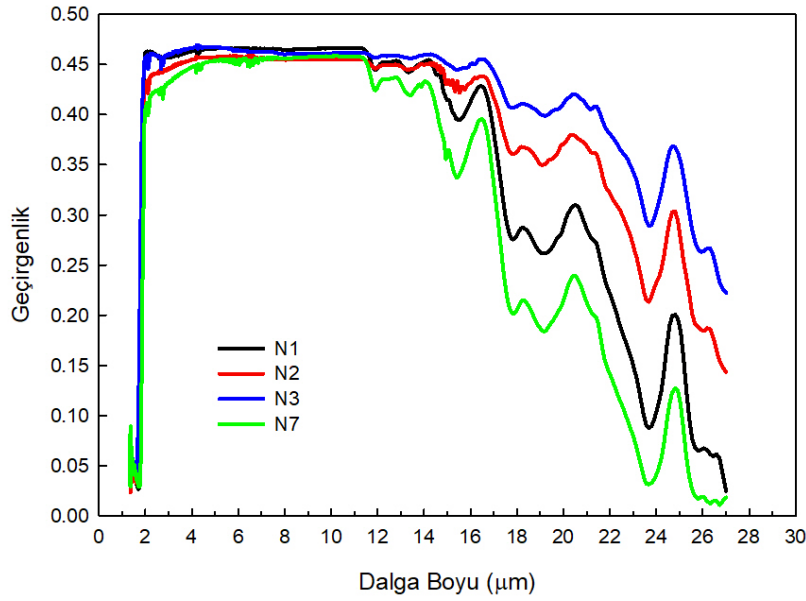


Şekil 4.8. N3 ve N4 numunelerinin ısıtıcı davranışı kıyaslaması

Her bir numune için gerilim uygulanmaya başladığı andan itibaren 30 s sonraki sıcaklık değerleri değişimi arasında ciddi fark gözlemlendi. 7 V değerine kadar yapılan kıyaslama ile metalik örgünün Ge pencerenin ısıtıcı olarak kullanılması arasındaki fark net bir şekilde belirlendi.

4.5. FTIR Geçirgenlik Sonuçları

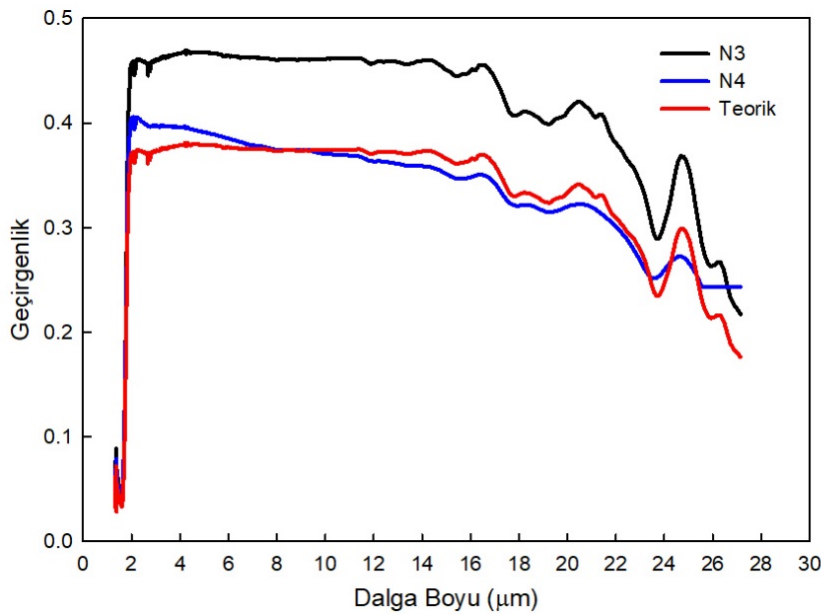
Farklı Sb katkı miktarlarına ve farklı kalınlıklara sahip Ge pencerelerin, çift taraflı taşlama ve parlatma işlemleri sonrasında, Şekil 4.9' da görüleceği üzere 2-12 μm bölgesi kızılötesi optik geçirgenliği %45-46 civarında elde edildi. Optik geçirgenliğin hemen hemen aynı olduğu ve pencere olarak orta-uzun dalga bölgeleri (MWIR-LWIR) için uygun olduğu tespit edildi. 12 μm bölgesinden sonra ciddi fark gözlemlendi. Bu bölgede N2 ve N3 numuneleri için kalınlık farkından (5,5 ve 0,5 mm) dolayı soğurma kaybı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca N1 ve N7 numuneleri için kıyaslama yapıldığında, Sb katkı miktarının 60 mg'dan 70 mg çıkması, bahsi geçen bölge için optik soğurmayı artırmaktadır.



Şekil 4.9. Farklı kalınlık ve öz direnç değerindeki optik pencerelerin optik geçirgenliği

Ayrıca N3 ve aynı dilimden hazırlanan N4 numuneleri için IR optik geçirgenlik sonuçları Şekil 4.10’ da sunuldu. Metalik örgüde temel amacımız düşük elektriksel yüzey direnci ve yüksek optik geçirgenlik elde etmektir. Metalik örgüden dolayı optik geçirgenlikte bir miktar azalma gözlemlendi.

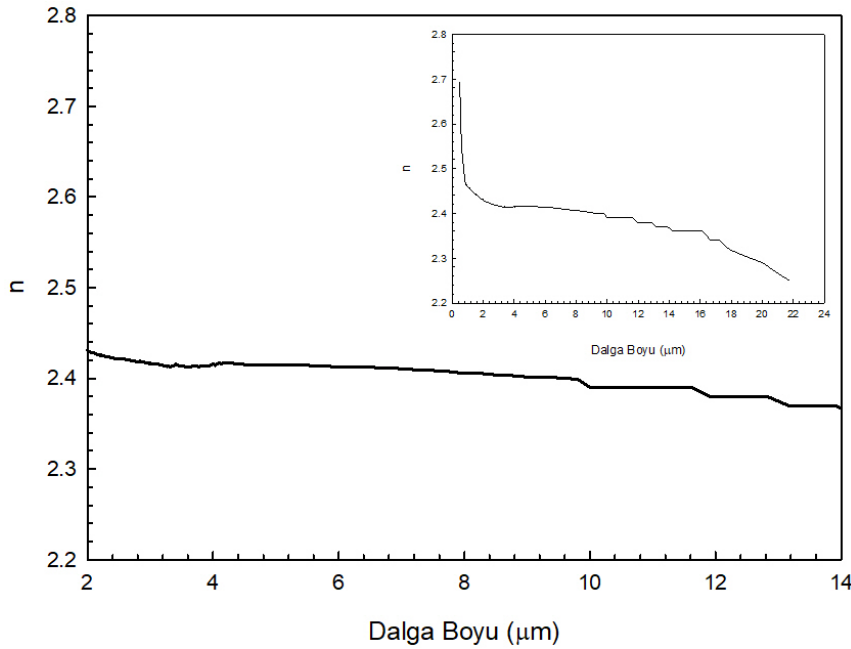
Sunulan çalışma için Eş. 2.19 ile yaklaşık %82 olarak hesaplanan değerle uyumlu bir deneysel optik geçirgenlik elde edildi.



Şekil 4.10. Metalik örgünün IR optik geçirgenlik ölçümü ve beklenen değeri

Metalik örgü uygulaması sonrasında Ge optik pencerenin IR optik geçirgenliği teoride elde ettiğimiz değere oldukça yakındır. LWIR bölgesinde geçirgenliğin giderek azalması, bahsi geçen bölge için dalga boyu değerinin giderek örgü parametrelerine yaklaşmasına atfedilebilir.

Optik geçirgenlik kayıpları, yansıma ve soğurma şeklinde gerçekleşmektedir. Kristal büyütme sırasında katkı miktarının iyi bir şekilde optimize edilmesi ile soğurma kayıpları minimize edilebilmektedir. Ancak Ge yüksek kırılma indisine sahip olduğundan dolayı optik geçirgenliğin ciddi bir kısmı yansıma kaybına uğramaktadır [4]. Bunu önleyebilmek için yansıma önleyici kaplama yapıldı.



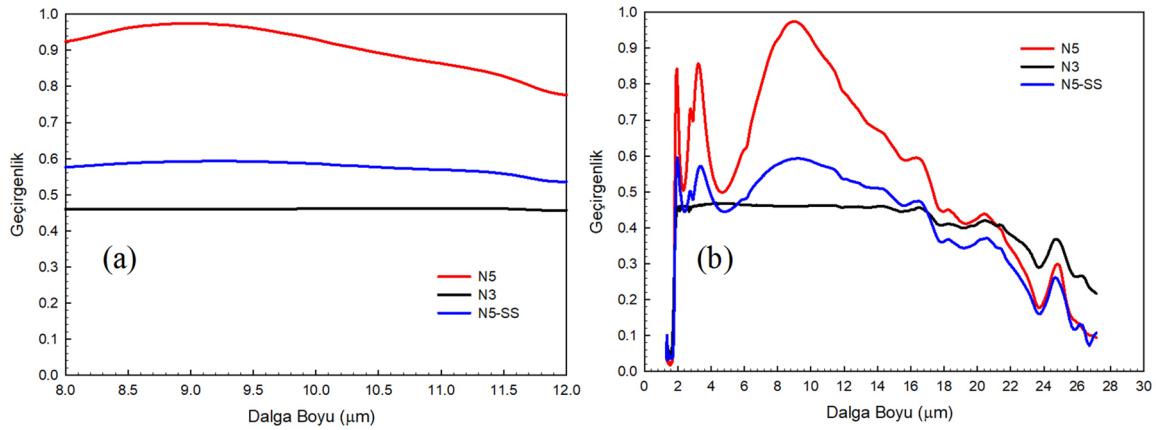
Şekil 4.11. ZnSe'nin dalga boyuna göre kırılma indisi

Bu çalışmada yansıma önleyici malzeme olarak ZnSe tercih edildi. ZnSe yüksek yasak enerji aralıklı ($\sim 2,7$ eV), görünür ve kızılötesi bölgede düşük soğurmaya sahip olması, Şekil 4. 11' den de görüleceği üzere yüksek kırılma indisi ve geniş bir aralıkta homojenliğine sahip olmasından dolayı tercih edildi [46].

ZnSe hem Ge hem de metalik örgü kaplı Ge optik pencerelerin her iki yüzeyine olmak üzere kaplandı ve her bir kaplama sonrası etkisi incelendi. Kaplama kalınlığı $10,6 \mu\text{m}$ dalga boyunda minimum yansıma olacak şekilde amaçlanmış olup aşağıda verilen eşitlik ile belirlendi [47].

$$d = \frac{\lambda}{4n} \quad (4.3)$$

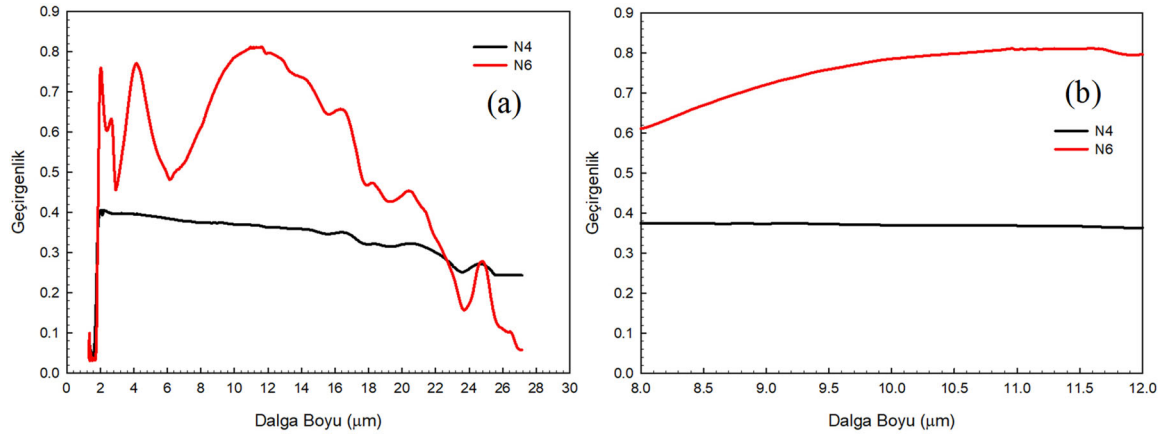
Burada λ hedeflenen dalga boyu, n kaplama malzemesinin kırılma indisi, d ise kalınlıktır. Bu ifadeye göre $10,6 \mu\text{m}$ 'de minimum yansımaya olması için yaklaşık kaplama kalınlığı 1100 nm olarak belirlendi. Bu çalışmada numunelerin her iki yüzeyine de belirlenen miktarda kaplama amaçlanmış ve profilometre kalınlık ölçüm sonuçlarında belirtilen değerler elde edildi.



Şekil 4.12. Yansımaya önleyici kaplama öncesinde ve sonrasında IR optik geçirgenlik

Şekil 4.12 (a, b)' de gösterilen N5-SS numunesi, N5 numunesinin ilk yüzey üzerine yansımaya önleyici kaplama (920 nm) sonrasında alınan optik geçirgenlik ölçümüdür. Tek taraflı yansımaya önleyici kaplama ile maksimum geçirgenlik değeri $0,59$ iken, çift yüzey kaplaması sonucunda maksimum geçirgenlik $0,97$ seviyelerine çıktığı gözlemlendi. Bu sonuca yansımaya önleyici kaplama ile ulaşılması, Ge pencerenin optik kaybının soğurma kaybindan dolayı değil, hemen hemen tamamının yansımaya kaybindan olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla kristal büyütme işlemi sırasında, katkı yoğunluğunun iyi seviyede ayarlandığını göstermektedir. Ayrıca, kaplama kalınlığının ön ve arka yüzeyler için sırasıyla yaklaşık 920 ve 980 nm olmasından dolayı, maksimum geçirgenlik değeri yaklaşık $9 \mu\text{m}$ dalga boyunda elde edildi.

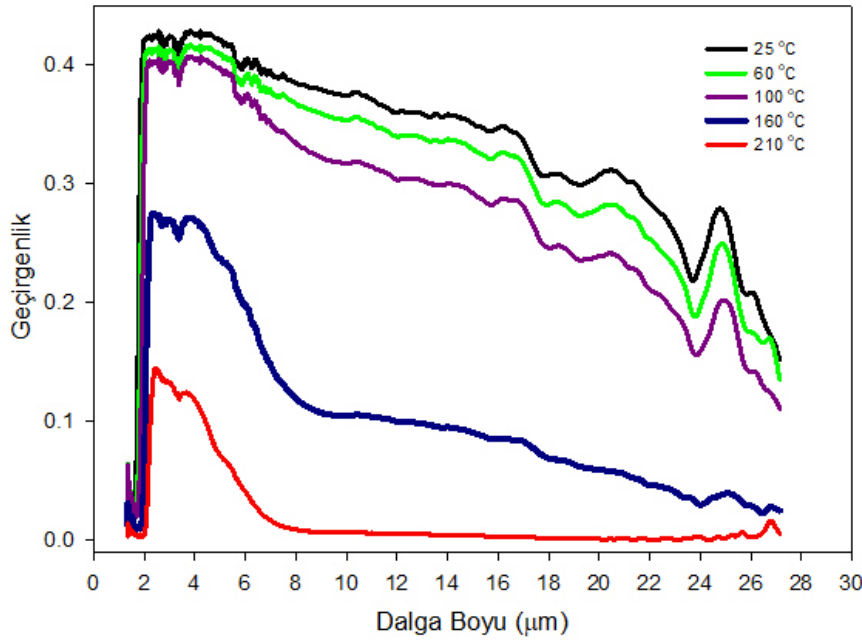
Au örgü kaplaması yapılan Ge optik pencere için ZnSe kaplaması her iki yüzeye de yapılarak kızılötesi optik geçirgenlik sonuçları Şekil 4.13' te verildi.



Şekil 4.13. N4 ve N6 numuneleri için IR optik geçirgenlik.

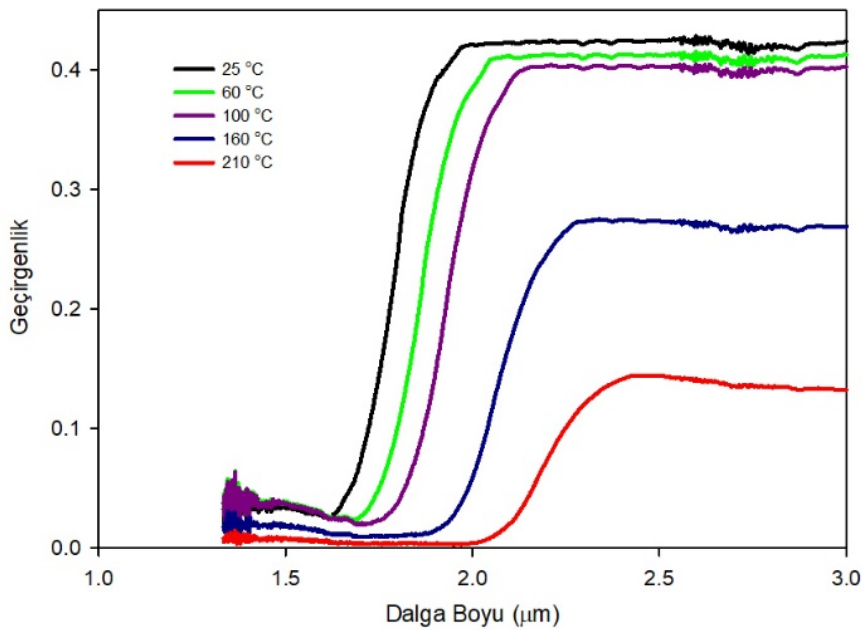
Au örgü kaplama üzerine yapılan yansıma önleyicinin kalınlığı ön ve arka yüzeyler için sırasıyla yaklaşık 1300 ve 1200 nm olmasından dolayı maksimum geçirgenlik değeri Şekil 4.13’ te görüleceği üzere yaklaşık 11,3 μm değerinde elde edildi. Bu dalga boyunda elde edilen maksimum optik geçirgenlik değeri yaklaşık 0,81’ dir. Kaplama kalınlığında oluşan değişikliğin sonuçlarımıza farklı bir dalga boyu değerinde maksimum geçirgenlik oluşturduğu net bir şekilde gözlemlendi. Bu sonuçlar çoklu yansıma önleyici katmanların simülasyonu yapılarak ve kaplama kalınlığı optimizasyonu ile iyileştirilebilir.

Ge bir yarıiletken olduğu için sıcaklığa bağlı olarak elektriksel iletim özellikleri değişecek ve bu durum optik özelliklerine de etkileyecektir. Bu nedenle, Ge optik pencereler üzerindeki Au örgü kaplamaların ısıtıcı davranışından yararlanarak sıcaklık bağımlı kızılötesi optik geçirgenliği belirlendi. Bu ölçümü almak için daha önce Au örgüye uygulanan gerilime ve zamana bağlı olarak ısıtıcı davranışı belirlenen parametreler kullanıldı. Aynı şartlar (gerilim-zaman) FTIR ölçümü alınıyorken oluşturuldu ve sıcaklık bağımlı kızılötesi optik geçirgenlik elde edildi.



Şekil 4.14. N4 numunesinin sıcaklık bağımlı IR optik geçirgenliği

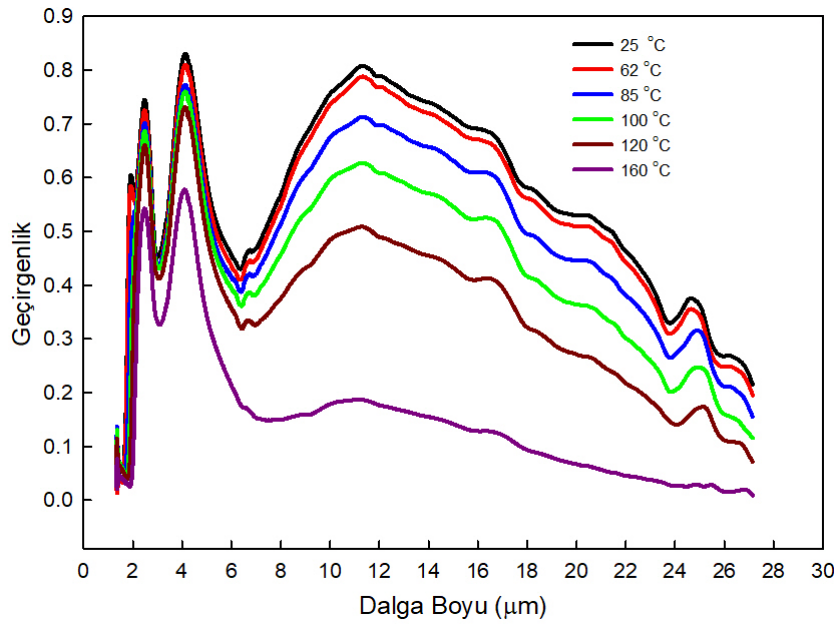
Artan sıcaklıkla beraber optik geçirgenliğin düştüğü Şekil 4.14'ten görülmektedir. N4 numunesi üzerinden alınan ölçümde, özellikle 60 °C' den daha yüksek sıcaklıklarda optik kaybın ciddi derecede arttığı gözlemlendi. Yüksek dalga boylarında daha hızlı bir optik kayıp oluşması, bu davranışın enerji değerine bağlı bir soğurma kaybı ile oluştuğuna işaret etmektedir. Sıcaklık değerinin artmasıyla (~ 210 °C) yüksek dalga boylarında (> 8 μm) optik geçirgenliğin hemen hemen sıfır olduğu gözlemlendi.



Şekil 4.15. N4 numunesinin sıcaklığa göre soğurma bandı kayması

Ayrıca Şekil 4.15’ ten görüleceği üzere, yakın kızılötesi bölgede sıcaklığın artmasıyla birlikte soğurma kenarının değişimi gözlemlendi. Artan sıcaklıkla beraber hem kızılötesi optik geçirgenliğin azaldığı hem de soğurma kenarının daha düşük enerjilere doğru kaydığı tespit edildi.

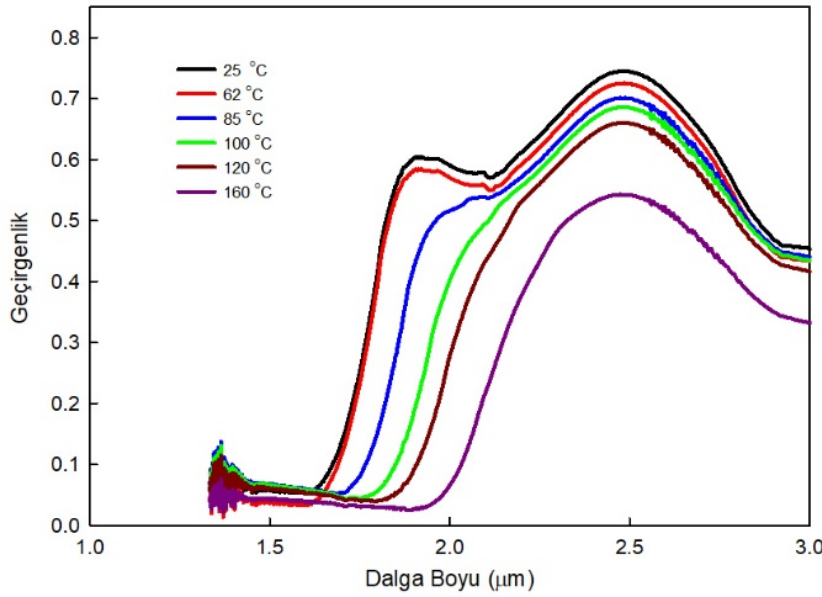
Sıcaklık bağımlı optik geçirgenlik ölçümleri, N6 için tekrarlandığında Şekil 4.16’da verilen sonuçlara ulaşıldı. Yaklaşık 60 °C’ye kadar ciddi bir optik kayıp oluşmadı.



Şekil 4.16. N6 numunesinin sıcaklık bağımlı IR optik geçirgenliği

Yansıma önleyici ve metal örgü kaplaması yapılan numune (N6) için 8 - 12 µm bölgesinde maksimum geçirgenlik değeri yaklaşık %81 değerinden, sıcaklığın artmasıyla (~ 160 °C) birlikte 0,17 seviyelerine kadar azaldığı gözlemlendi. N4 numunesinde olduğu gibi N6 numunesi için 8 µm ve daha yüksek dalga boylarında optik kaybın daha hızlı gerçekleştiği belirlendi.

Yakın kızılötesi bölgeye odaklandığımızda, (Şekil 4.17) sıcaklığın artmasıyla birlikte soğurma bandı kenarının düşük enerjilere kaydığı net bir şekilde izlendi. Bu bölgedeki optik geçirgenlikte 8 - 12 µm bölgesine göre daha az bir optik kayıp olduğu tespit edildi.

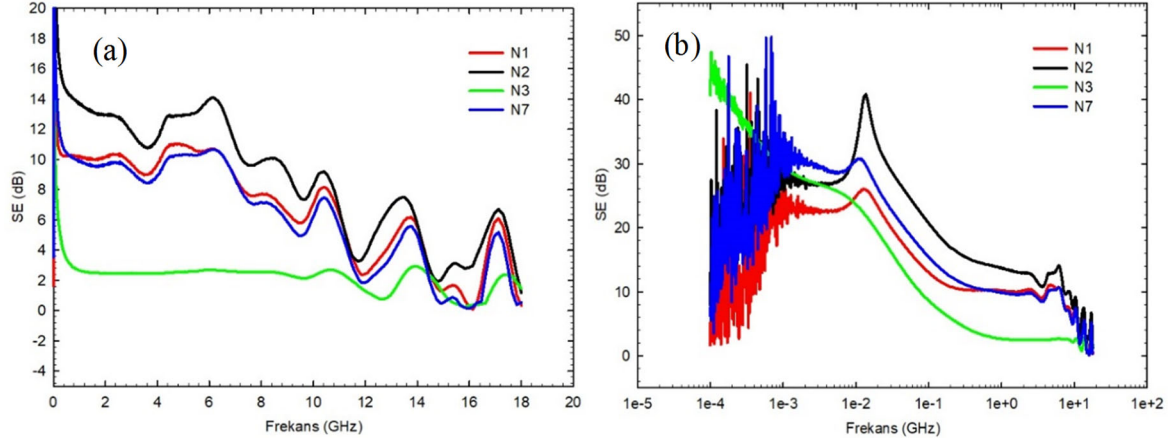


Şekil 4.17. N6 numunesinin sıcaklığa göre soğurma bandı kayması

Ge optik pencereler için sıcaklık bağımlı kızılötesi optik geçirgenlik sonuçlarına göre, buzbuğu önleyici olarak metalik örgülerin 50 – 60 °C'ye kadar kullanımı uygundur. Ayrıca yarıiletken olan Ge optik pencere veya kubbeler ses hızı altı uygulamalar için elverişli olduğu sonucuna ulaşılabılır. Ses hızını aşması durumunda sürtünmesinden kaynaklı Ge pencere ısınacak ve istenmeyen optik kayıplar oluşacaktır.

4.6. EMI Kalkanlama Sonuçları

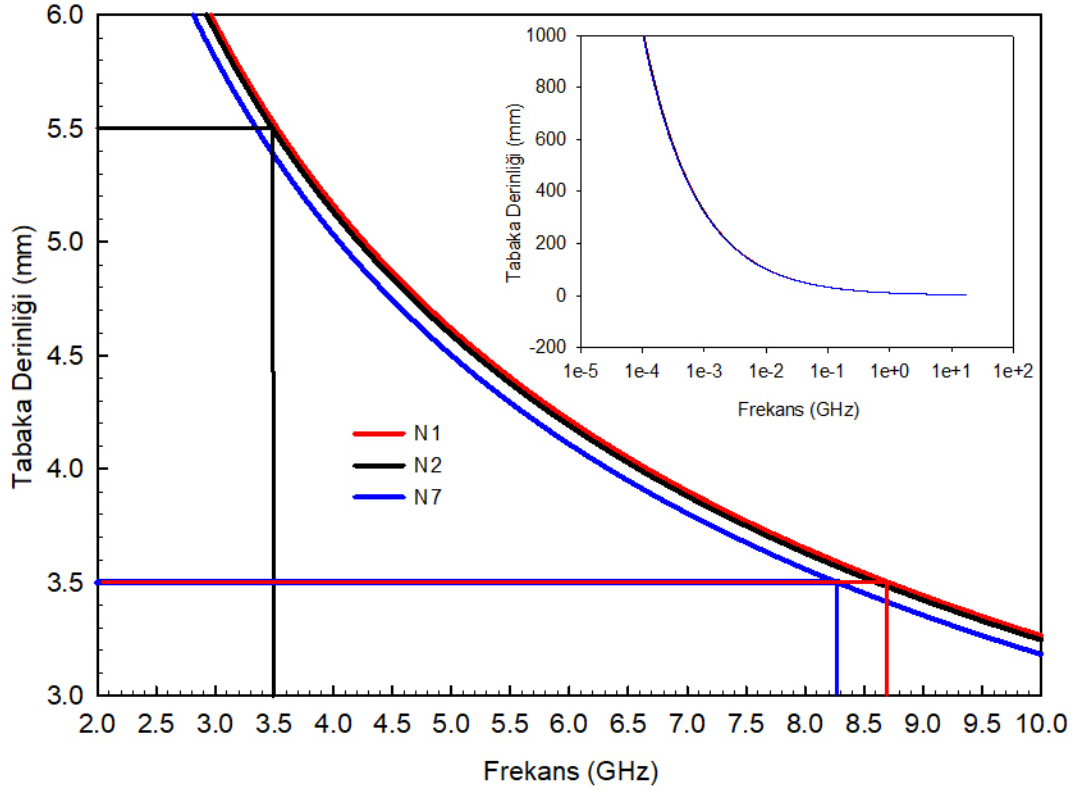
Ge optik pencereler için SE sonuçları logaritmik ve lineer skalada Şekil 4.18' de verildi. Şekil 4.18 (b)' den anlaşılacağı üzere yaklaşık 500 MHz kadar yüksek SE değeri gözlemlendi. 500 MHz ile yaklaşık 6,5 GHz aralığındaki frekanslarda SE değeri hemen hemen sabittir ve daha yüksek frekanslarda dalgalanmaların başladığı ve bir miktar azalma olduğu belirlendi. Düşük frekanslardaki yüksek SE değeri ASTM D4935-99 standartında da belirtildiği gibi azalan yer değiştirme akımlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca yaklaşık 2 MHz' e kadar gürültü işaretleri izlendi.



Şekil 4.18. (a) lineer ve (b) logaritmik skalada SE sonuçları

Normalde artan frekansla birlikte soğurma kaybından dolayı SE değerinin de artması gerekmekteydi ancak bu artış gözlenemedi. Soğurma kaybının frekansa bağlı artışını açıklamak için numune kalınlığı (t) ve tabaka derinliği (δ) kıyaslaması gerekmektedir. Tabaka derinliği yüksek frekanslarda veya düşük öz dirençli numunelerde azalacaktır ve bu sayede soğurma kaybı net bir şekilde gözlenecektir. Tabaka derinliği ifadesine göre yüksek frekansta daha az bir tabaka derinliği oluşmalıdır. Bilindiği üzere numune kalınlığı tabaka derinliğinden fazla ise soğurma kaybı baskın olacaktır ve frekansa bağlı artış net bir şekilde gözlenebilecektir.

Şekil 4.19’ da verilen grafikte, numunelerin frekansa bağlı tabaka derinliği değişimi Eş. 2.8’ e göre hesaplandı ve numune kalınlıklarının tabaka derinliğine eşit olduğu frekans değerleri belirtildi. t değerinin δ değerine eşit olduğu frekans değerleri, N1 numunesi için 8,71 GHz, N2 numunesi için 3,49 GHz ve N7 numunesi için 8,28 GHz’ dir. Bu frekans değerlerinin üzerinde ölçüm alınmış olmasına rağmen frekansa bağlı artış gözlenememesi numunelerin elektriksel ince olmamasından kaynaklanmaktadır.



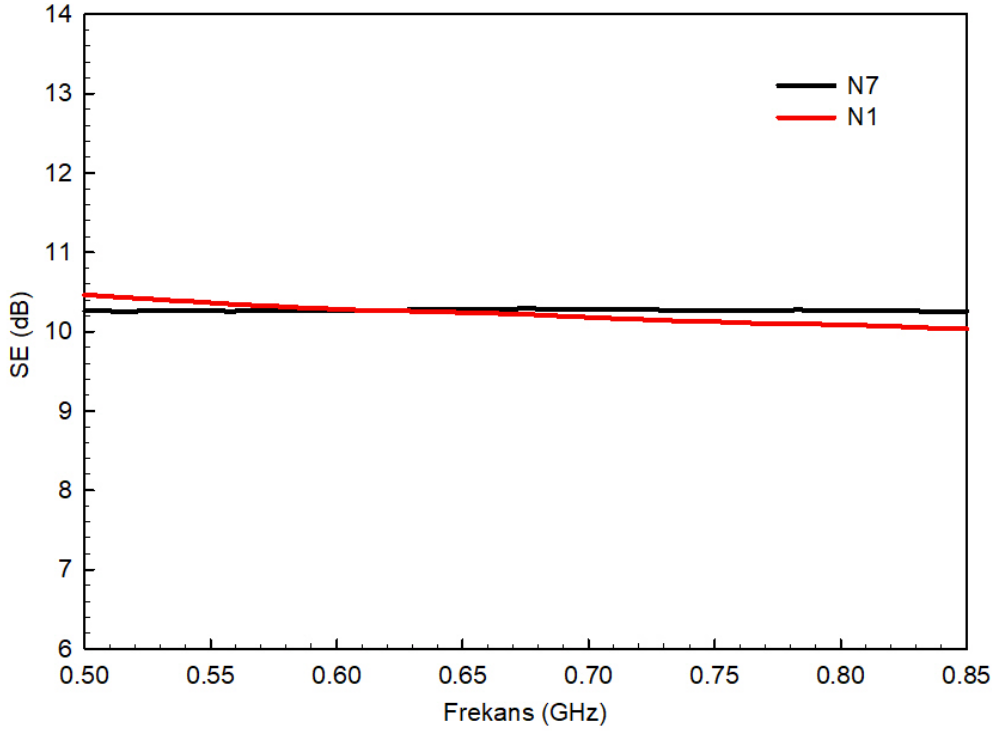
Şekil 4.19. Büyütülen numunelerin frekansa göre δ değeri

ASTM D4935-99 standartına göre numuneler elektriksel ince olmalıdır. Bu standartta göre elektriksel ince tanımı

$$t < \frac{\lambda}{100} \quad (4.4)$$

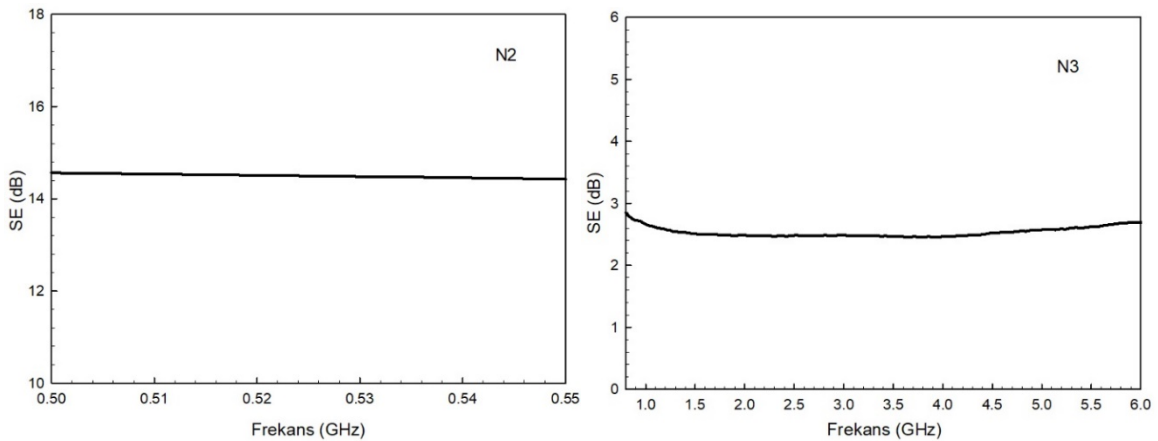
şeklinde. Burada t numune kalınlığı ve λ dalga boyudur [48]. Bu çalışmadaki numuneler için elektriksel ince oldukları üst frekans (f_m) değerleri N1 ve N7 için yaklaşık 856,7 MHz, N2 için yaklaşık 547,4 MHz ve N3 için yaklaşık 5,96 GHz' dir. Görüleceği üzere f_m değerleri δ değerlerinden küçüktür. Bundan dolayı soğurma kaybının net bir şekilde gözlenemediği açıktır. Ayrıca f_m değerlerinden sonra SE ölçümlerinde dalgalanmalar olduğu Şekil 4.18' de görülebilmektedir. Bu dalgalanmaların neredeyse aynı frekanslarda gerçekleşmesi bunun Ge' un karakteristiğine atfedilebilir. Sonuç olarak, SE ölçümleri yaklaşık 500 MHz ile f_m değerleri arasında dikkate alınmalıdır. Şekil 4.20-21' de bu frekans değerleri arasında elde edilen deneysel sonuçlar verildi.

500 MHz ile f_m frekans aralığında $t < \delta$ olduğundan soğurma kaybına bağlı net bir artış gözlenmedi ve SE sonuçlarının yaklaşık sabit olduğu tespit edildi.



Şekil 4.20. N1 ve N7 numunelerinin 500 MHz- f_m değeri arasındaki SE sonuçları

N1 ve N7 aynı kalınlığa ve farklı öz dirence sahip optik pencereler olup, 500 MHz ve yaklaşık f_m değeri olan 850 MHz aralığında kıyaslamalı SE sonuçları Şekil 4. 20’de ki gibidir. Öz direnci biraz daha az olan N7 numunesinin yaklaşık 600 MHz ve sonrasında SE değerinde çok az bir farka neden olduğu gözlemlendi. Hemen hemen aynı öz dirence sahip olmalarından dolayı SE değerinde de ihmal edilebilecek bir düzeyde fark izlendi.

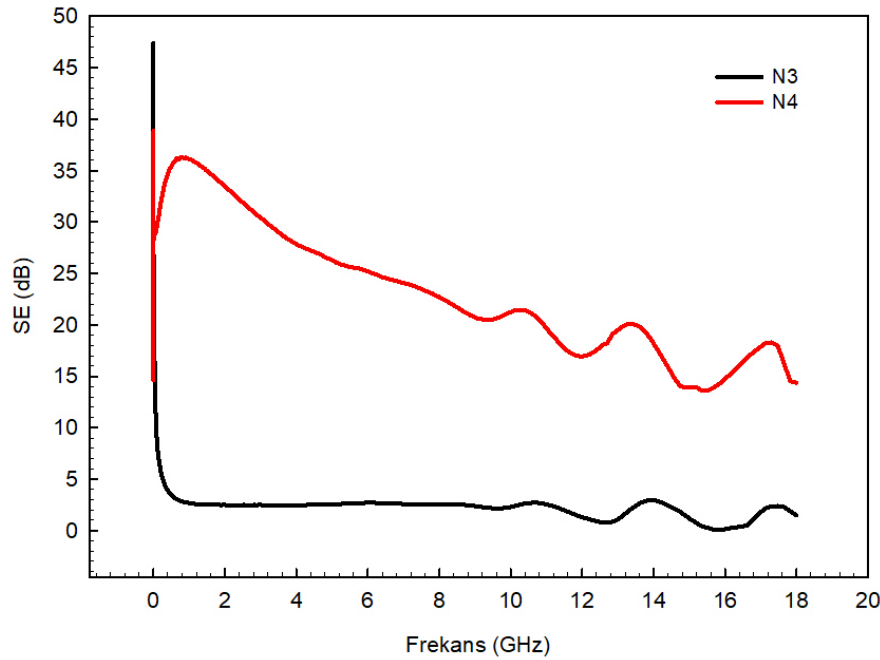


Şekil 4.21. N2 ve N3 numunelerinin 500 MHz- f_m değeri arasındaki SE sonuçları

N2 numuneler arasında en kalın ve en düşük elektriksel yüzey direncine sahip olduğu için en yüksek SE değeri elde edildi. Ancak çok dar bir aralıkta (500 – 550 MHz) SE değeri elde

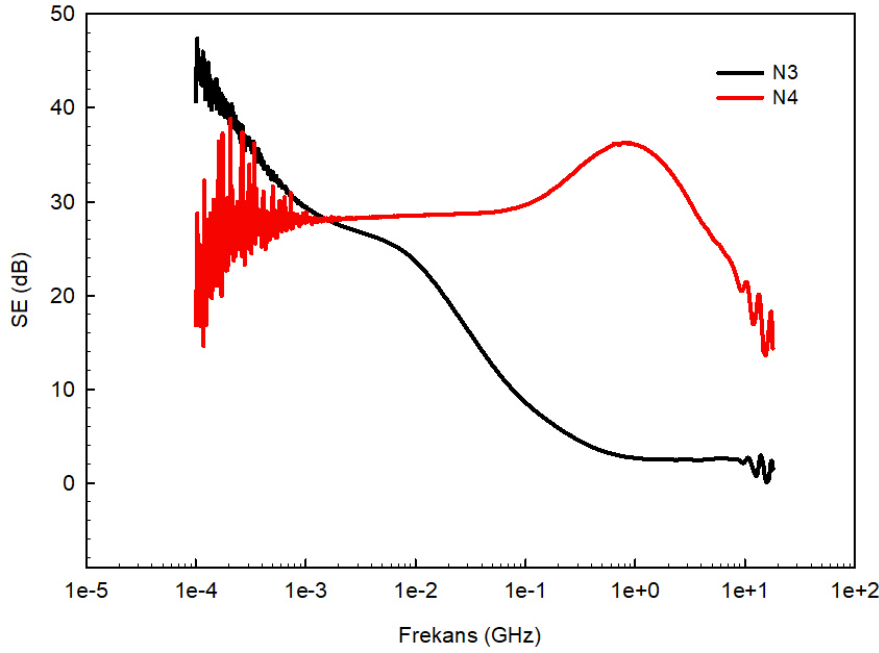
edilebildi. N3'ün öz direnci N2 ile aynı olmasına rağmen, çok daha ince olduğu için hem soğurma kaybı daha az gerçekleşti hem de yüksek elektriksel yüzey direncine bağlı olarak daha az yansıma kaybı gözlemlendi. Bu nedenle en düşük SE değerine sahiptir. Ayrıca N3 numunesi için 6 GHz'e kadar $t < \delta$ olsa da yaklaşık 3,5 GHz' ten sonra soğurma kaybı etkisiyle SE değerinde bir miktar artış gözlemlendi.

Ayrıca N3 ve aynı dilimden alınmış olan N4 numuneleri için SE karşılaştırmalı sonuçları Şekil 4. 22' de verilmiştir. Metalik örgü sayesinde yaklaşık $830 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ değerinden $1,13 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ 'a azalan elektriksel yüzey direnci SE değerinde ciddi bir artışa neden olduğu tespit edildi.



Şekil 4.22. N3 ve N4 numuneleri için SE sonuçları

N4 üzerinde bulunan kısmi iletken tabaka sayesinde, SE ölçüm frekans aralığındaki elektromanyetik dalganın çok büyük bir kısmı yansıma kaybına uğramıştır. 1 GHz' ten sonra artan frekansla beraber SE değerinde azalma gözlemlendi. Bu durum, giderek azalan dalga boyunun, metalik örgü parametrelerine yaklaşmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.23. N3 ve N4 numuneleri için logaritmik skalada SE sonuçları

Düşük frekans değerlerinde, azalan yer değiştirme akımlarından dolayı yaklaşık 500 MHz ve altında yüksek SE değeri elde edilmiştir. Bu durum Şekil 4. 23' te N3 numunesi için, 500 MHz'e kadar gürültü değerinden sonra ciddi oranda azalarak, N4 numunesi için ise kısmen sabit devam ederek gözlemlendi. Gözlemlenen bu farklılık, elektriksel yüzey iletkenliği farkından dolayı oluşmaktadır. Ayrıca üst sınır olarak N3 ve N4 numunelerinin elektriksel ince oldukları son frekans değeri (f_m) dikkate alınmalıdır. Daha önce N3 numunesi için yukarıda da belirtildiği üzere ve her iki numune aynı kalınlıkta olduğu için f_m değeri yaklaşık 6 GHz' dir. Kısaca N3 ve N4 numunelerimiz için SE ölçüm sonuçlarının geçerli olduğu frekans aralığı yaklaşık 500 MHz-6 GHz' dir.

5. SONUÇLAR

Farklı katkı yoğunluklarında n-tipi üç adet Ge (111) tek kristali Czochralski yöntemiyle büyütüldü ve dilimleme, taşlama, parlatma işlemlerinin ardından, farklı kalınlıklarda optik pencereler elde edildi. Bu pencerelerin bazılarının üzerine farklı amaçlarla kaplamalar yapıldı. Üzerine kaplama yapılan ve kaplama yapılmayan Ge optik pencerelerin analizleri yapıldı ve sonuçlar değerlendirildi.

Üretilen numunelerin oda sıcaklığında öz direnç ve elektriksel yüzey direncinin değişimine bakıldı. Üretilen farklı katkı yoğunluklu kristaller için katkı yoğunluğu arttıkça, bu seviyelerde ki katkılar için beklendiği gibi öz direncin azaldığı gözlemlendi. Metalik örgü kaplaması yapılan Ge pencere için beklendiği gibi ciddi derecede azalarak $1,13 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ elektriksel yüzey direnci elde edildi. Kaplama öncesinde elektriksel yüzey direnci yaklaşık $830 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ değerindeydi.

Kaplama yapılmayan Ge pencerelerin yüksek çözünürlüklü X-ışını ölçümlerinde, (111) yöneliminde kristalleştiği gözlemlendi. X-ışını ölçüm sonuçlarından yararlanarak, örgü ve kristal parametreleri (dislokasyon yoğunluğu, mikro gerilmeler ve parçacık boyutu) belirlendi. Katkı yoğunluğunun artmasıyla kristal kalitesinin azaldığı gözlemlendi.

Yansıma önleyici kaplama malzemesi olarak ZnSe kullanıldı ve oda sıcaklığında Ge ve SLG üzerine kaplama yapıldı. Kaplama sonrasında 300°C de tavlanan ZnSe/Ge ve ZnSe/SLG yapıları için X-ışını toz kırınımı ile alınan ölçümleri sonucunda, ZnSe' nin (111) yöneliminde kristalleştiği gözlemlendi. ZnSe/SLG için X-ışını ölçümünden yararlanarak (111) yönelimindeki örgü ve kristal parametreleri belirlendi.

Ge optik pencerelerin kızılötesi optik geçirgenlik sonuçları, 3-5 ve 8-12 μm atmosferik geçirgen bölgeler için, optik pencere kullanımına uygun olduğu görüldü. Katkı yoğunluğu ve pencere kalınlığının artmasıyla, optik geçirgenlikte kayıplar gözlemlendi. Metalik örgü kaplı olan Ge optik pencerenin optik geçirgenliği, beklendiği seviyede azaldığı tespit edildi.

Her iki yüzeye de yapılan yansıma önleyici kaplamalar sayesinde, 8 - 12 μm bölgesinde hedeflenen yüksek geçirgenlik elde edildi. ZnSe/Ge/ZnSe için maksimum %97 optik geçirgenliğe ulaşıldı. ZnSe/Au/Ge/ZnSe için optik geçirgenlik yaklaşık % 81 seviyelerinde

elde edildi. Metalik (Au) örgünün yaklaşık % 82 kızılötesi optik geçirgenlik değeri için, elde edilen bu değer oldukça iyidir.

Ge optik pencerelerin ısıtıcı davranışı zamana bağlı olarak sabit gerilimler altında alındı. Metalik örgü kaplama bulunmayan Ge pencere için sıcaklık değişimi yaklaşık 15 V'de elde edildi. Bu gerilim değerinde yaklaşık 10 - 15 °C kadar bir artış gözlenmiş ve numune sıcaklığı yaklaşık 40 °C olduğunda, sıcaklık kontrolsüz olarak ani bir şekilde artmaya başladı. Sadece Ge'nin yarıiletken özeliği kullanılarak sıcaklık artışı, yüksek gerilimde, ani ve kontrolsüz olmaktadır. Bunun için çok iyi bir ısıtıcı optimizasyonu gerektiği tespit edildi. Au/Ge yapısı için düşük gerilim değerlerinde bile oldukça hızlı bir sıcaklık değişimi elde edildi ve 7 V'de maksimum 210 °C'ye ulaşıldı. ZnSe/Au/Ge/ZnSe yapısı için sıcaklık değişim hızının daha yavaş olduğu gözlemlendi. Ayrıca, Ge'nin yarıiletken doğası gereği, sıcaklığın artmasıyla iletkenlik kazandığı ve Ge yaklaşık 50 °C' den sonra kendisi de ısıtıcı olarak davrandığı gözlemlendi. Isıtıcı davranışı için metalik örgülerin çok daha avantajlı olduğu tespit edildi.

Sıcaklığa bağlı optik geçirgenlik hem Au/Ge ve hem de ZnSe/Au/Ge/ZnSe yapısı için elde edildi. Her ikisi içinde yaklaşık 50-60 °C değerine kadar ciddi bir optik kayıp gözlemlenmedi. Ancak 60 °C' den sonra özellikle 8-12 µm bölgesinde daha hızlı olmak üzere yüksek optik kayıplar gözlemlendi. Yaklaşık 210 °C' de optik geçirgenliğin 8-12 µm bölgesinde hemen hemen sıfır olduğu belirlendi. Sıcaklığın artmasıyla soğurma bandı kenarının değişimi de net bir şekilde gözlemlendi. Soğurma bandının artan sıcaklıkla birlikte düşük enerjilere doğru kaydığı tespit edildi. Sıcaklığa bağlı optik geçirgenlik sonuçları, Ge optik pencerelerin kullanımında sıcaklık kısıtlaması olduğunu göstermektedir. Bu nedenle Ge pencerenin sıcaklığını artıracak ses hızı üstü gibi uygulamalar için elverişli olmadığı değerlendirildi.

EMI kalkanlama sonuçları, farklı kalınlıklar ve farklı öz direnç değerlerine göre incelendi. Kalınlığın artmasıyla birlikte hem soğurma hem de yansıma kaybı arttığı ve kaplaması yapılmayan Ge optik pencereler arasında en kalın olan numunenin en yüksek SE değerine sahip olduğu gözlemlendi. Ölçüm tekniğindeki kısıtlamadan dolayı, SE sonuçlarının numunelerin elektriksel ince oldukları son frekans değerine kadar geçerli olduğu tespit edildi. Ayrıca, Ge üzerine metalik örgü kaplaması yapılarak EMI kalkanlama değeri ciddi

derecede artırıldı. Kaplama öncesinde 1 GHz’te yaklaşık 2,5 dB olan SE değeri, metalik örgünün düşük elektriksel yüzey direnci sayesinde, yaklaşık 36 dB olarak elde edildi.

Bu çalışma ile elektro-optik sistemlerde pencere olarak kullanılan Ge tek kristali üretildi ve karakterizasyonu yapıldı. CZ tekniği ile büyütülen Ge tek kristali sonrasında optik pencere haline getirildi, üzerine metalik örgü ve yansıma önleyici kaplamalar yapılarak; yüksek optik geçirgenliğe, yüksek EMI kalkanlama ve iyi bir ısıtıcı davranışına sahip olarak elde edildi. Bu çalışmadaki veri ve analizlerin daha iyi optik performans sergileyen kızılötesi optik pencere geliştirilmesine imkân sağlayacağı düşünülmektedir. İleriki çalışmalarda, kızılötesi görüntüleme sistemleri için yüksek optik geçirgenliğe, daha iyi EMI kalkanlama ve ısıtıcı performansına sahip olmasından dolayı Ge optik pencereler için metalik örgü kaplamalarının kullanılması önerilmektedir. Ayrıca hem farklı metalik örgü desenleri kullanılarak kırınım deseni etkisinin hem de farklı optik pencere malzemeleri (ZnS, safir, ALON, vb.) üzerinde metalik örgü kullanımında kalkanlama ve ısıtıcı etkilerinin göz önüne alındığı farklı çalışmalar önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Claeys, C., Simoen, E. (2007). *Germanium-Based Technologies From Materials to Devices* (First edition). Amsterdam: Elsevier, 16-21.
2. Aydoğan, Ş. (2011). *Katıhal Fiziği* (İkinci baskı). Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, 17-19.
3. Mark, S.A., Frank, J.B. (2012). Modern trends in crystal growth and new applications of sapphire. *Journal of Crystal Growth*, 360, 134–145.
4. Hartmann, R. (1992, December). *Airborne FLIR optical window examples*. Paper presented at the International Society for Optics and Photonics, San Diego, CA, United States.
5. Sullivan, R. M. (2009, April). A historical view of germanium as an infrared window material. In *Window and Dome Technologies and Materials XI* (Vol. 7302, p. 73020L). International Society for Optics and Photonics.
6. Savrun, E., and Del Aguila, H. (1998). Electrically conductive tungsten silicide coatings for EMI/RFI shielding of optically transparent windows. *Journal of Materials Science*, 33(11), 2893-2897.
7. Han, Y., Liu, Y., Han, L., Lin, J., and Jin, P. (2017). High-performance hierarchical graphene/metal-mesh film for optically transparent electromagnetic interference shielding. *Carbon*, 115, 34-42.
8. Han, J., Wang, X., Qiu, Y., Zhu, J., and Hu, P. (2015). Infrared-transparent films based on conductive graphene network fabrics for electromagnetic shielding. *Carbon*, 87, 206-214.
9. S Lee, H. C., Kim, J. Y., Noh, C. H., Song, K. Y., and Cho, S. H. (2006). Selective metal pattern formation and its EMI shielding efficiency. *Applied Surface Science*, 252(8), 2665-2672.
10. Han, Y., Lin, J., Liu, Y., Fu, H., Ma, Y., Jin, P., and Tan, J. (2016). Crackle template based metallic mesh with highly homogeneous light transmission for high-performance transparent EMI shielding. *Scientific Reports*, 6, 25601.
11. Bright, C. I. (1994, August). *Broadband EMI shielding for electro-optical systems*. Paper presented at the Symposium Record, Chicago, IL, United States.
12. Pieratt, M. W., Carney, S., Stout, M., Hibbard, D. L., and Miller, G. (2013, June). Design of uniform window heating structures for electro-optical systems. Paper presented at the International Society for Optics and Photonics, Baltimore, Maryland, United States.
13. Alpman, M. E., and Senger, T. (2015, May). *Simple optimization method for EMI mesh pattern design*. Paper presented at the International Society for Optics and Photonics, Baltimore, Maryland, United States.

14. Ott, H. W. (2009). *Electromagnetic compatibility engineering* (First edition). John Wiley and Sons, 238-249.
15. Rao, K. D. M., and Kulkarni, G. U. (2014). A highly crystalline single Au wire network as a high temperature transparent heater. *Nanoscale*, 6(11), 5645-5651.
16. Gupta, R., Rao, K. D. M., Kiruthika, S., and Kulkarni, G. U. (2016). Visibly transparent heaters. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(20), 12559-12575.
17. Saayman, M. (2016). *Materials for infrared optics*. OPTI 521 Tutorial.
18. Depuydt, B., Theuwis, A., and Romandic, I. (2006). Germanium: From the first application of Czochralski crystal growth to large diameter dislocation-free wafers. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 9(4-5), 437-443.
19. Pekar, G. S., Singaevsky, A. F., Lokshin, M. M., Gordienko, V. I., and Mazurin, I. V. (2018). Large polycrystalline optical germanium Ge: Na plates with improved optical parameters and their application. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 21(2).
20. Van Goethem, L., Van Maele, L. P., and Van Sande, M. (1986, December). *Trade-offs using poly versus monocrystalline germanium for infrared optics*. Paper presented at the International Society for Optics and Photonics, San Diego, United States.
21. Válek, L., and Sik, J. (2012). Defect Engineering During Czochralski Crystal Growth and Silicon Wafer Manufacturing. In *Modern Aspects of Bulk Crystal and Thin Film Preparation*. InTech.
22. Doering, R., and Nishi, Y. (2007). *Handbook of semiconductor manufacturing technology*. Florida: CRC Press, 12-15.
23. Dash, W. C. (1958). Silicon crystals free of dislocations. *Journal of Applied Physics*, 29(4), 736-737.
24. Lin, W., and Hill, D. W. (1983). Large-Diameter Czochralski Silicon Crystal Growth. In *Silicon Processing*. ASTM International.
25. Lin, W., and Benson, K. E. (1987). The science and engineering of large-diameter Czochralski silicon crystal growth. *Annual Review of Materials Science*, 17(1), 273-298.
26. Fiegl, G. (1983). Recent advances and future directions in CZ-silicon crystal growth technology. *Solid State Technology*, 26(8), 121-131.
27. Carruthers, J. R., and Nassau, K. (1968). Nonmixing cells due to crucible rotation during Czochralski crystal growth. *Journal of Applied Physics*, 39(11), 5205-5214.
28. Kakimoto, K., Eguchi, M., Watanabe, H., and Hibiya, T. (1988). In-situ observation of solid-liquid interface shape by X-ray radiography during silicon single crystal growth. *Journal of Crystal Growth*, 91(4), 509-514.

29. Kakimoto, K., Eguchi, M., Watanabe, H., and Hibiya, T. (1989). Natural and forced convection of molten silicon during Czochralski single crystal growth. *Journal of Crystal Growth*, 94(2), 412-420.
30. Kern, W. (1970). This week's citation classic. *Journal of the National Cancer Institute*, 32, 547-68.
31. Jacoby, K. T., Pieratt, M. W., Halman, J. I., and Ramsey, K. A. (2009, April). *Predicted and measured EMI shielding effectiveness of a metallic mesh coating on a sapphire window over a broad frequency range*. Paper presented at the International Society for Optics and Photonics, Orlando, Florida.
32. Gonschorek, K. H., and Vick, R. (2009). *Electromagnetic compatibility for device design and system integration*. Springer Science and Business Media.
33. Morari, C., and Balan, I. (2015). Methods for determining shielding effectiveness of materials. *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, 63(2), 126
34. Wilson, P. F., Ma, M. T., and Adams, J. W. (1988). Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 30(3), 239-250.
35. Deng, S., Pommerenke, D., Hubing, T., and Shin, D. (2008). An experimental investigation of higher order mode suppression in TEM cells. *IEEE transactions on Electromagnetic Compatibility*, 50(2), 416-419
36. Vasquez, H., Espinoza, L., Lozano, K., Foltz, H., and Yang, S. (2009). Simple device for electromagnetic interference shielding effectiveness measurement. In *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
37. Çat, Y., Baran, V., Afacan, G., Coşar, M. B., and Özçelik, S. (2018). Investigation of Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of CZ Grown Ge Optical Windows. *Crystal Research and Technology*, 53(8), 1800069.
38. Lee, H. C., Kim, J. Y., Noh, C. H., Song, K. Y., and Cho, S. H. (2006). Selective metal pattern formation and its EMI shielding efficiency. *Applied Surface Science*, 252(8), 2665-2672.
39. Yan-Jun, S., Hao, C., Song-hang, W., Yan-Bing, L., and Li, W. (2015). Study on electromagnetic shielding of infrared/visible optical window. *Modern Applied Science*, 9(13), 231.
40. Murray, I. B., Densmore, V., Bora, V., Pieratt, M. W., Hibbard, D. L., and Milster, T. D. (2011, May). Numerical comparison of grid pattern diffraction effects through measurement and modeling with OptiScan software. Paper presented at the International Society for Optics and Photonics, Orlando, Florida, United States.
41. Halman, J. I., Ramsey, K. A., Thomas, M., & Griffin, A. (2009, April). *Predicted and measured transmission and diffraction by a metallic mesh coating*. Paper presented at the International Society for Optics and Photonics, Orlando, Florida, United States.

42. Aydoğan, Ş. (2011). *Katıhal Fiziği* (İkinci baskı). Ankara, Nobel Yayın Dağıtım, 123.
43. Başköse, Ü.C. (2011). *Rasajilin Ve Tuzlarının Moleküler Yapıları Ve Titreşimsel Spektrumlarının Teorik Olarak İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 8-10.
44. Ueno, T., and Swanson, W. H. (1989). Response pooling between chromatic and luminance systems. *Vision Research*, 29(3), 325-333.
45. Neudeck, P. G., Okojie, R. S., and Chen, L. Y. (2002). High-temperature electronics-a role for wide bandgap semiconductors?. *Proceedings of the IEEE*, 90(6), 1065-1076.
46. Ashraf, M., Akhtar, S. M. J., Khan, A. F., Ali, Z., and Qayyum, A. (2011). Effect of annealing on structural and optoelectronic properties of nanostructured ZnSe thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(5), 2414-2419
47. Firoozifar, S. A. R., Behjat, A., Kadivar, E., Ghorashi, S. M. B., and Zarandi, M. B. (2011). A study of the optical properties and adhesion of zinc sulfide anti-reflection thin film coated on a germanium substrate. *Applied Surface Science*, 258(2), 818-821.
48. Mayor, J., Tobon, L., Nagy, Z., and Tamura, E. (2013). *2013 USNC-URSI radio science meeting*. Paper presented at the Joint with AP-S Symposium, Lake Buena Vista, Florida.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇAT, Yunus
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 20.10.1989, Çankaya
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (537) 651 69 45
 e-mail : yunuscat89@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi/ Fizik Bölümü	Devam ediyor
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ Fizik Bölümü	2014
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Fizik Bölümü	2011
Lise	Dr. Şerafettin Tombuloğlu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Aselsan Hassas Optik A.Ş.	Optik İmalat Müh.
2014-2015	Gazi Üniversitesi	Proje Destek Uzmanı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Çat, Y., Baran, V., Afacan, G., Coşar, M. B., & Özçelik, S. (2018). Investigation of Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of CZ Grown Ge Optical Windows. *Crystal Research and Technology*, 53(8), 1800069.

Bildiri ve Sunular

1. Çat, Y., Baran, V., Kasap, M., ve Özçelik, S. (2013, 20 Aralık). Hacimli Tek Kristal Ge Büyütülmesi ve Optik Karakterizasyonu. *19. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı*, Ankara.

2. Baran, V., Boyalı, E., Çat, Y., Kasap, M., ve Özçelik, S. (2013, 20 Aralık). Katkısız Ge Tek-Kristal Yarıiletkeninin Büyütülmesi ve Elektriksel Karakterizasyonu. *19. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı*, Ankara.
3. Çat, Y., Baran, V., Başköse, Ü. C., Asar, T., Kurtuluş, G., Çetin, S. Ş., ve Özçelik, S. (2014, 26 Aralık). Katkısız Germanyum Tek Kristal Büyütülmesi ve Yapısal - Optik Karakterizasyonu. *20. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı*, Ankara.
4. Asar, T., Sertel, T., Korkmaz, B., Özen, Y., Efkere, H. İ., Baran, V., Çat, Y., Kurtuluş, G., Özçelik, S. (2014, 26 Aralık). Germanyum Alttaş Üretimi: İlk Çalışmalar. *20. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı*, Ankara.
5. Baran, V., Çat, Y., Asar, T., Çetin, S.Ş., Kasap, M., ve Özçelik, S. (2015, 25 Aralık). Sb Katkılı Hacimli Germanyum Tek Kristal Büyütülmesi ve Karakterizasyonu. *21. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı*, Ankara.
6. Çat, Y., Baran, V., Kasap, M., Özçelik, S. (2016, 16 Aralık). Germanyum Kızılötesi Optik Pencere ve Elektromanyetik Girişim. *22. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı*, Ankara.
7. Çat, Y., Başköse, Ü. C., Yaman, A. D., ve Özçelik, S. (2018, 15 Mayıs). ZnSe Antireflective Layer Coating on Ge Optical Window. *I. Işık ve Işık Temelli Teknolojiler Çalıştayı*, Ankara.
8. Karaca, A., Çat, Y., Baran, V., Sağlam, S., ve Özçelik, S. (2018, 15 Mayıs). MWIR Bölgesi için Yansıma Önleyici İnce Film Kaplama / Anti-Reflection Thin Film Coating for MWIR Region. *I. Işık ve Işık Temelli Teknolojiler Çalıştayı*, Ankara.
9. Baran, V., Çat, Y., Boyalı, E., Asar, T., Kasap, M., ve Özçelik, S. (2016, 2 Ekim). Sb Doping Effect on the Electrical Properties of Germanium Single Crystals. *2nd International Congress on The World of Technology And Advanced Materials*, Kırşehir.

Dereceler

1. Çat, Y., Baran, V., Kasap, M., ve Özçelik, S. (2014). Kızılötesi Görüntüleme Sistemleri İçin Germanyum Mercek Geliştirilmesi, *Gazi Üniversitesi II. Bilim Günleri Proje Pazarı Yarışması - Birincilik Ödülü*, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Görev aldığı projeler (bursiyer)

1. Özçelik, S. (2015-2017). Elektromanyetik Girişim Engelleyici Germanyum Optik Geliştirme-5140074, *TÜBİTAK*, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Hobiler

Doğa yürüyüşü, kitap okumak



GAZİ GELECEKTİR..