

**ZİFİR-ALTIN KAPLAMALI SOĞUTMASIZ BOLOMETRELERİN
OPTİK MODELLENMESİ**

**OPTICAL MODELLING OF BLACK-GOLD COATED UNCOOLED
BOLOMETERS**

ZEYNEP ÇİĞDEM TOĞRUL

PROF. DR. ÇİĞDEM SEÇKİN GÜREL
Tez Danışmanı

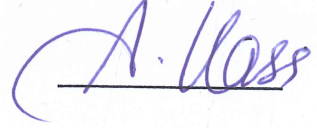
Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

ZEYNEP ÇİĞDEM TOĞRUL tarafından hazırlanan “**ZİFİR-ALTIN KAPLAMALI SOĞUTMASIZ BOLOMETRELERİN OPTİK MODELLENMESİ**” adlı bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından **Elektrik ve Elektronik Mühendisliği ANA BİLİM DALI**’nda **Yüksek Lisans** olarak kabul edilmiştir.

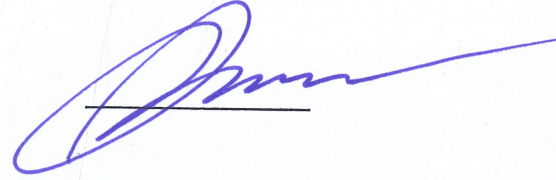
Prof. Dr. Ali KARA

Başkan



Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL

Danışman



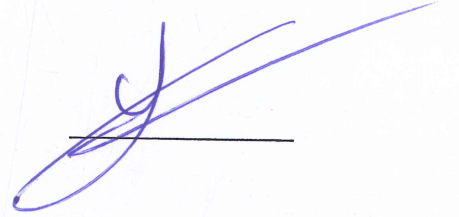
Prof. Dr. Uğur BAYSAL

Üye



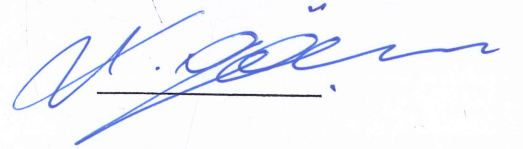
Doç. Dr. Umut SEZEN

Üye



Dr. Öğr. Üyesi Dinçer GÖKCEN

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



Sevgili aileme...

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- ☐ Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- ☒ Tezimin/Raporumun 01.01.2020 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- ☐ Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.

- ☐ Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi

17 / 05 / 2018

(İmza)

Zeynep Çiğdem TOĞRUL

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

ZEYNEP ÇİĞDEM TOĞRUL

ÖZET

ZİFİR-ALTIN KAPLAMALI SOĞUTMASIZ BOLOMETRELERİN OPTİK MODELLENMESİ

Zeynep Çiğdem TOĞRUL

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL

Mayıs 2018 , 81 sayfa

Mikrobolometre temelli soğutmasız kızılötesi kameralar endüstride, sivil ve askeri uygulamalarda her geçen gün daha çok kullanılmaya başlanmaktadır. Algılayıcılık değerlerinin yükselmesi ile bu kameralar, bakımı ve kullanımı çok zor, aynı zamanda da maliyeti oldukça yüksek olan soğutmalı kameraların yerini almaya başlamıştır. Soğutmasız kameraların pazar payı her geçen gün büyüğünden mikrobolometre teknolojisine gösterilen ilgi de artmaktadır. Bu ilginin temel hedefi üretim maliyetlerini düşürmektir. Maliyeti azaltmak için ise CMOS işlemler ile üretilebilen hidrojenize edilmiş amorf silikon (a-Si:H) teknolojisine dayanan algılayıcı tabakalar kullanılmaktadır. Ancak bu materyalin düşük kızılötesi emiciliğe sahip olması ek bir emici tabaka kullanımını gerektirmektedir. Literatürde var olan yapılarda CMOS işleme uygun emici tabaka olarak silisyum dioksit ve silisyum nitrür gibi materyaller kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında ise a-Si:H algılayıcı katman üzerine hem orta hem de uzun kızılötesi bandında emiciliği çok yüksek olan zifir-altın kaplamanın uygulanabilirliği değerlendiril-

miştir. Bu değerlendirmeyi yapabilmek için mikrobolometrenin tüm katmanlarının optik modellemeleri elde edilmiştir. Ek olarak elde edilen bu model aracılığıyla çok katmanlı bir mikrobolometrenin istenilen bantta kızılötesi emiciliği hesaplanmıştır. Mikrobolometrenin algılayıcılık ve ısı zaman sabiti gibi performans parametrelerinin ölçümü için sanal bir test ortamı kurulmuştur. Bu sanal test ortamında a-Si:H zerine zifir-altın, silisyum dioksit, silisyum dioksit ve silisyum nitrür ikilisi gibi emici tabakalar kaplanarak karşılaştırmalı testler yapılmıştır. Bu çalışmada saniyede 30 kare yakalayacak hıza sahip bir tasarımda zifir-altın kaplamalı mikrobolometre yapısının parametreleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda ise zifir-altın kaplamanın diğer kaplamalardan 5 kat daha yüksek algılayıcılık değerlerine sahip olduğu gsterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikrobolometre, a-Si:H algılayıcı, Zifir-altın kaplama, Algılayıcılık, Zaman sabiti, 30 FPS

ABSTRACT

OPTICAL MODELLING OF BLACK-GOLD COATED UNCOOLED BOLOMETERS

Zeynep ıgdem TOGRUL

M.S., Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor : Prof. Dr. ıgdem Seçkin GÜREL

May 2018, 81 pages

Microbolometer based uncooled infrared cameras have been used mostly in industrial, civilian and military applications. With the increase in detectivity values, these cameras have begun to take the place of cooled cameras, which are very difficult to maintain and use, and at the same time very expensive. As market share of uncooled cameras grows day by day, interest shown in microbolometer technology is also increasing. The main objective of this interest is to reduce production costs. In order to reduce the cost, sensor layers based on hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) technology which can be produced by CMOS processes are used. However, this material requires the use of an additional absorber layer due to its low infrared absorbance. Materials such as silicon dioxide and silicon nitride are used as the absorber layer which are also suitable with CMOS process, in existing structures in the market.

In this thesis, applicability of gold-black coating providing very high absorption on both the

medium and far infrared bands, on the a-Si:H sensing layer is evaluated. In order to make this evaluation, optical models of all layers of microbolometer have been obtained. In addition to that, infrared absorbance of a multilayered microbolometer in the desired band was also calculated by obtained model. A virtual test environment has been established for the measurement of performance parameters such as detectivity and thermal time constant. In this virtual test environment, gold-black, silicon dioxide, silicon dioxide and silicon nitride absorbing layers were coated on a-Si:H and comparative tests were carried out. As a result of this study, it has been shown that the designed gold-black coated microbolometer structure has a detectivity of 5 times higher than other coatings in a design with a speed of 30 frame per second.

Keywords: Microbolometer, a-Si:H sensor, Gold-black coating, Detectivity, Time constant, 30 FPS

TEŞEKKÜR

Başta hiç bir desteğini esirgemeyen tez danışmanım ve yol göstericim Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL'e, tüm zorluklara karşı beraber göğüs gerdiğim hayat arkadaşım, eşim, her şeyim Barış TOĞRUL'a, her zaman yanımda olduklarını hissettiğim, artık uçsuz bucaksız denizlerde birlikte yol alan rahmetli annem Emel TOĞRUL ve rahmetli babam Levent TOĞRUL'a, bugün başardığım ve elde edebildiğim her şeyde payları olan varlığı dünyalara bedel annem Ayten YAKIŞIR ve huzurum, çınar ağacım, dayanağım babam Yılmaz YAKIŞIR'a, ablam Nazlı Buket YAKIŞIR'a, abim Burak TOĞRUL'a, kardeşim gibi sevdiğim Zeynep KIRÇUVAL TOĞRUL'a ve ailemizin yeni üyesi biricik yeğenim Eloşuma, ailem gibi sevdiğim tüm dostlarıma ve çalışma arkadaşlarıma, son olarak işverenim ASELSAN A.Ş.'ye teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Tezin Akışı	2
2 KURAMSAL BİLGİLER	4
2.1 Kızılötesi Işınım	4
2.2 Kızılötesi Algılayıcılar	7
2.2.1 Foton Dedektörleri	7
2.2.2 Isıl Dedektörler	8
2.2.2.1 Termopil	8
2.2.2.2 Mikrobolometre	9
2.3 Mikrobolometre Performans Parametreleri	13
2.3.1 Direnç Sıcaklık Katsayısı (TCR)	13

2.3.2	Isıl İletkenlik (G_{th})	14
2.3.3	Isıl Zaman Sabiti (τ)	15
2.3.4	Tepkisellik (R)	16
2.3.5	Gürültü Kaynakları	18
2.3.5.1	Johnson Gürültüsü	18
2.3.5.2	Isıl Gürültü	19
2.3.5.3	1/f Gürültüsü	20
2.3.6	Gürültü Eşlenik Güç (NEP)	21
2.3.7	Algılayıcılık (D^*)	21
2.3.8	Gürültü Eşlenik Sıcaklık Farkı (NETD)	21
3	AMORF SİLİKON	23
3.1	Silikonun Atomik Yapısı	23
3.1.1	PECVD Yöntemi ile Hidrojenlendirilmiş a-Si Üretimi	24
3.2	Amorf Silikonun Elektriksel Özellikleri	25
3.2.1	Hidrojenli Amorf Silikonun Elektriksel Özellikleri	26
3.3	Amorf Silikonun Optik Özellikleri	29
4	ZİFİR-ALTIN KAPLAMA	32
4.1	Zifir-Metal Nedir?	32
4.1.1	Zifir-Altın	32
4.2	Teorik Yapı	33
4.2.1	Drude-Lorentz Modeli	34
4.2.2	Landau-Lifshitz-Looyenga Teorisi	37

4.2.3	Fresnel Denklemleri	39
4.2.4	Çok Katmanlı Fresnel Denklemleri	44
4.3	Zifir-Altın Üretim Yöntemi	45
4.4	Zifir-Altın Üretim Parametreleri	47
4.4.1	Basıncın Etkisi	47
4.4.2	Birikim Hızının Etkisi	50
5	MİKROBOLOMETRE MODELLEME VE PERFORMANS BULGULARI . .	51
5.1	Çok Katmanlı Mikrobolometre Modelleme	51
5.2	Mikrobolometre Karakterizasyonu	59
5.2.1	Modeli Oluşturma ve Test Ortamı	59
5.2.2	Modeli Çalıştırma ve Performans Hesaplama	63
5.3	Parametre Tarama Mekanizması	66
5.3.1	Tarama Bulguları	68
6	SONUÇLAR	72
	KAYNAKLAR	74
	ÖZGEÇMİŞ	80

TABLÖLER LİSTESİ

TABLÖLER

Tablo 2.1	Üreticiler ve teknolojileri [24] [25] [26]	11
Tablo 5.1	Farklı özelliklerde üretilmiş ziftir-altın kaplamalar	56
Tablo 5.2	Mikrobolometre modellemesinde kullanılacak sabitler	60
Tablo 5.3	Tarama aralıkları	67
Tablo 5.4	Tarama sonunda elde edilen mikrobolometre parametreleri	69

ŞEKİLLER LİSTESİ

ŞEKİLLER

Şekil 2.1	Görünür ışık spektrumu [9]	4
Şekil 2.2	Kızılötesi ışık spektrumu [10]	5
Şekil 2.3	Obje sıcaklığına göre yaydığı ışımanın spektrumu [12]	7
Şekil 2.4	Termopil yapısı [22]	9
Şekil 2.5	Örnek bir mikrobolometre yapısı [23]	10
Şekil 2.6	Örnek bir mikrobolometrenin elektron mikroskopu görüntüleri [27] [28] .	12
Şekil 2.7	Bir algılayıcının ısı akışları	16
Şekil 2.8	Isıl devrenin elektriksel benzetimi	17
Şekil 3.1	Silikon atomunun çeşitli şekillerde bağlanması	23
Şekil 3.2	PECVD biriktirme odası düzeneği	25
Şekil 3.3	a-Si:H üretimi biriktirme çalışmaları	26
Şekil 3.4	Çeşitli silikon yapılarının kuşak özellikleri	27
Şekil 3.5	Sarkıntı bağlara bağlanan hidrojen atomları [44]	28
Şekil 3.6	Farklı termometrelerin karakteristik özellikleri	29
Şekil 3.7	Farklı silikon yapılarının kızılötesi emiciliği [49]	31
Şekil 4.1	Kızılötesi dedektör üzerine zifir-altın kaplama [55]	33
Şekil 4.2	Kütleli altının frekansa göre dielektrik sabiti [55]	36

Şekil 4.3 Farklı boyutlardaki altın parçacıklarının emilme ve saçılma kesit alanları [60]	38
Şekil 4.4 Landau-Lifshitz-Looyenga ortalama dielektrik hesaplama [61]	39
Şekil 4.5 Fresnel sınır koşulları [55]	42
Şekil 4.6 Çok katmanlı yapılarda yansıma	45
Şekil 4.7 Altın kaplamada kullanılan vakum odası düzeneği	46
Şekil 4.8 Mie çarpışması yaratan nano partiküller [55]	48
Şekil 4.9 Nano partiküllerin oluşturduğu zifir-altın ile kaplı yüzey [55]	48
Şekil 4.10 a,b,c sırasıyla 0.3, 1.5 ve 3 Torr basıncı ile üretilen kaplamasının üstten görünümünü; d,e,f ise aynı sıra ile bu kaplamaların yandan görünümünü vermektedir [55]	49
Şekil 4.11 Farklı basınçlarda yapılan kaplamaların özellikleri [55]	49
Şekil 4.12 Farklı birikim hızlarının emiciliğe etkisi [69]	50
Şekil 5.1 Farklı kaplamaların orta ve uzak kızılötesi bandındaki dielektrik katsayıları	53
Şekil 5.2 Farklı kaplamaların orta ve uzak kızılötesi bandındaki indisleri	54
Şekil 5.3 Mikrobolometreyi oluşturan katmanların orta ve uzak kızılötesi bandındaki R, A, T değerleri	55
Şekil 5.4 Tek katmanlı yapı için kullanılan modelin doğruluğunun karşılaştırılması	56
Şekil 5.5 Çok katmanlı yapıların emicilik karşılaştırması	57
Şekil 5.6 Çok katmanlı yapı emicilik hesabı işlem basamakları	58
Şekil 5.7 Çok katmanlı yapı için kullanılan modelin doğruluğunun karşılaştırılması	58
Şekil 5.8 Mikrobolometre performansının ölçülmesini sağlayan test ortamı	61
Şekil 5.9 300K sıcaklık farkından kaynaklanan güç dağılımı ve aynı bant içindeki emicilik	62

Şekil 5.10 Mikrobolometre karakterizasyonu ve performansını ölçen algoritma	63
Şekil 5.11 Mikrobolometre ısııl model	63
Şekil 5.12 Farklı emici katmana sahip mikrobolometre çeşitleri	66
Şekil 5.13 Parametre tarama örneği	68
Şekil 5.14 Tip A, B ve C yapılarının orta ve uzak kızılötesindeki emicilik oranları . .	70
Şekil 5.15 Saniyede 6 kare görüntüleme (3 Hz kesici) ile test edilen a-Si:H katman sıcaklığı	71
Şekil 5.16 Saniyede 30 kare görüntüleme (15 Hz kesici) ile test edilen a-Si:H katman sıcaklığı	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

R_i	Akım Tepkiselliği
R_v	Voltaj Tepkiselliği
G_{th}	Isıl iletkenlik
D^*	Algılayıcılık
τ	Zaman Sabiti
$a - Si : H$	Hidrojenize Amorf Silikon
SiO_2	Silisyum Dioksit
Si_3N_4	Silisyum Nitrür
VO_x	Vanadyum Oksit
k	Boltzman Sabiti
K	Kelvin
E_A	Aktivasyon Enerjisi
h	Planck Sabiti
ω	Açısal Frekans
ω_0	Harmonik Osilatör Frekansı
ω_p	Plazmon Frekansı
ν_F	Fermi Hızı
Γ	Sönümlenme Katsayısı
ε	Dielektrik Sabiti
c	Işık Hızı
λ	Dalga Boyu
T	Sıcaklık
η	Emicilik

Kısaltmalar

BW	Bandwidth (Bant Genişliği)
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor (Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken)
CVD	Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
FPS	Frame Per Second (Saniyedeki Kare Sayısı)
LCD	Liquid Crystal Display (Sıvı Kristal Ekran)
LWIR	Long Wave Infrared (Uzun Dalga Kızılötesi)
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems (Mikro Elektro Mekanik Sistemler)
MWIR	Medium Wave Infrared (Orta Dalga Kızılötesi)
NEP	Noise Equivalent Power (Gürültü Eşlenik Güç)
NETD	Noise Equivalent Temperature Difference (Gürültü Eşlenik Sıcaklık Farkı)
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (Plazma ile Güçlendirilmiş Kimyasal Buhar Biriktirme)
RMS	Root Mean Square (Ortalama Kare Kök)
ROIC	Readout Integrated Circuit (Okuma Entegre Devresi)
SWIR	Short Wave Infrared (Kısa Dalga Kızılötesi)
TCR	Temperature Coefficient of Resistance (Direnc Sıcaklık Katsayısı)

1. GİRİŞ

Kızılötesi kameralar görünür ışık kameralarından farklı olarak elektromanyetik spektrumun $3 \mu\text{m}$ ile $15 \mu\text{m}$ 'lik kısımlarını algırlar. Kızılötesi kameraları görünür ışık kameralarından ayıran en büyük fark ışık kaynağının tanımıdır. Görünür ışık kameralarında görüntüyü oluşturan ışığın kaynağı obje dışında bir aydınlatıcıdır. Kızılötesi kameralarda ise bu kaynak objenin kendisidir. Bu sayede ortamda hiç bir aydınlatıcı kaynak olmadan görüntüleme yapılabilmektedir. Algılanan enerji objenin sıcaklığından kaynaklı bir spektrum dağılımıdır. Soğutmasız kameralarda algılama genellikle kameraya gelen ısı enerjisinin direnç değişikliği gibi elektriksel bir değere dönüştürülmesi ile sağlanır. Bu tarz kameraların üretimi ucuz ve bakımı soğutmalı kameralara göre çok daha kolay olsa da, kızılötesi kameralar aynı çözümlükte görünür ışık kameralarından yüzlerce kat pahalı olabilmektedirler. Bunun en büyük sebebi kızılötesi kameraların adet olarak çok daha az üretilmesi ve üretim yöntemlerinin tamamının CMOS proses ile yapılamamasıdır. Ancak son zamanlarda hidrojenleştirilmiş amorf silikon (a-Si:H) materyalinin mikrobolometre içerisinde algılayıcı tabaka olarak kullanılması bu konuda büyük bir adım olmuştur [1]. Amorf silikon yıllardır güneş panelleri ve LCD gibi büyük sektörlerde kullanıldığından detaylı bir şekilde karakterize edilmiş olup, bu malzemenin üretim yöntemleri olgunlaşmıştır [2]. Ayrıca amorf silikonun hidrojene ek olarak bor, germanyum, bizmut gibi farklı materyaller ile zenginleştirilmesi sayesinde uygulamanın ihtiyacı olan özelliklere sahip sensörler üretilebilmektedir [3]. Bu olumlu özelliklerinden dolayı amorf silikon gün geçtikçe mikrobolometre yapılarında daha çok kullanılacaktır.

Amorf silikonun avantajlarının yanında optik özelliklerinden kaynaklı yetersiz yanları da vardır. Orta ve uzak kızılötesi bandında düşük emicilik değerlerine sahip olması, üzerine gelen enerjinin soğurulup ısıya çevrilmesine engel olmaktadır. Sonuç olarak düşük algılayıcılık seviyeleri elde edilebilmektedir. Bu eksikliği azaltmak için kızılötesi emici katmanlar, amorf silikon sensör katmanı üzerine kaplanmaktadır. Günümüzde emici katman olarak sıklıkla SiO_2 ve Si_3N_4 kullanılmaktadır [4]. Bu malzemeler CMOS prosese uygun oldukları için tercih edilmektedirler. Ancak dielektrik özellikli bu malzemeler uzak kızılötesi bandında çok kısıtlı bir dalga boyu aralığında yüksek emiciliğe sahiptirler. Ayrıca yüksek ısı

kütleye sahip olmalarından dolayı kalınlıkları ile emiciliğini arttırmak hem mikrobolometrenin ısı zaman sabitini arttırmakta, hem de bir noktadan sonra algılayıcılığı olumsuz yönde etkilemektedir. Bu kaplama çeşitlerine alternatif olarak metal içerikli zifir-altın kullanılmaktadır. Zifir-altın tüm kızılötesi bandında çok yüksek emiciliğe, düşük termal kütleye ve yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. Bu olumlu yanlarından dolayı literatürde sıklıkla geçmektedir. Zifir-altın kaplama genellikle vanadyum dioksit (VO_x) algılayıcı tabaka ile kullanılmış olup, bu tür kaplama ile çok yüksek algılayıcılık değerleri elde edilebilmiştir [5] [6]. Ancak üretim yönteminin CMOS prosese uyumlu olmaması bir dezavantajdır. Diğer bir yandan ise zifir-altın kaplama şu an için kısmen pahalı bir kaplama olsa da işlemindeki sıcaklıklar kaplanacak CMOS yapılara zarar vermediğinden kullanılmasında bir engel bulunmamaktadır. Son zamanlarda üretim yöntemleri konusunda birçok başarılı çalışma [7] yapılmış olması kısa vadede zifir-altın kaplamanın önemini yitirmeyeceğini göstermektedir.

Tez kapsamında literatürde incelenmemiş olan a-Si:H algılayıcı tabaka üzerine zifir-altın kaplamanın uygulanabilirliği işlenmiştir. Bu incelemenin yapılabilmesi için mikrobolometre detaylı bir şekilde modellenmiş ve bu model literatürdeki bilgilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Modelin doğru bir biçimde çalıştığı gözlemlendikten sonra mikrobolometreyi karakterize edebilecek bir test ortamı sunulmuştur. Bu altyapı sayesinde tezin hedefi olan sanide 30 kare görüntüleyebilecek bir mikrobolometre pikselinin tasarım parametreleri bulunmuştur. Bu parametreler sadece zifir-altın kaplı yapı için değil, SiO_2 ve $SiO_2 + Si_3N_4$ kaplı yapılar için de bulunarak karşılaştırmalı testler yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda zifir-altın kaplı a-Si:H algılayıcı katmanlı mikrobolometrenin performans değerlerinin diğer yapılara göre ciddi bir şekilde iyileştiği görülmüştür.

1.1 Tezin Akışı

Bölüm 2'ye, devam eden bölümlerde kullanılacak genel bilgilerin verilmesiyle başlanmıştır. Bu bilgilerin başında kızılötesi bandının genel özellikleri ve kızılötesi algılayıcı sistemlere değinilmiştir. Devamında tez kapsamında modellenecek olan mikrobolometre tipli kızılötesi algılayıcı yapının temel özellikleri ortaya konulmuştur. Bu özellikler tez sonunda karşılaştırma olarak kullanılacak algılayıcılık değerinin bulunabilmesi için gerekli teorik temelleri oluşturduğundan, bu konular detaylı bir biçimde işlenmiştir.

Bölüm 3'te ise mikrobolometre içerisinde algılayıcı katman olarak kullanılan amorf silikon yapısı anlatılmıştır. Amorf silikonun ne demek olduğu, diğer silikon yapılarından farkı, elektriksel ve optik özellikleri detaylıca işlenmiş olup, üretim yöntemlerine fikir vermesi açısından kısaca değinilmiştir. Ayrıca amorf silikonun farklı maddeler ile zenginleştirilebileceği ve bunların farklı elektriksel özelliklere sahip olabileceği gösterilmiştir.

Devam eden bölüm olan Bölüm 4'te tezde en çok üzerinde durulan zifir-altın yapısı işlenmiştir. Bu bölüme zifir-altın kavramının ne olduğu ile başlanmıştır. Devamında zifir-altın yapısının optik özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için gerekli teorik yapı da burada anlatılmıştır. Anlatılan teorik yapı sadece zifir-altın ile ilgili olmayıp mikrobolometre karakterizasyonu için gerekli olan ek bilgileri de içermektedir. Bölümün devamında zifir-altın katmanının literatürdeki üretim yöntemlerinden bahsedilmiştir. Son olarak üretim yöntemlerinin optik ve mekanik özelliklere etkisi gösterilmiştir.

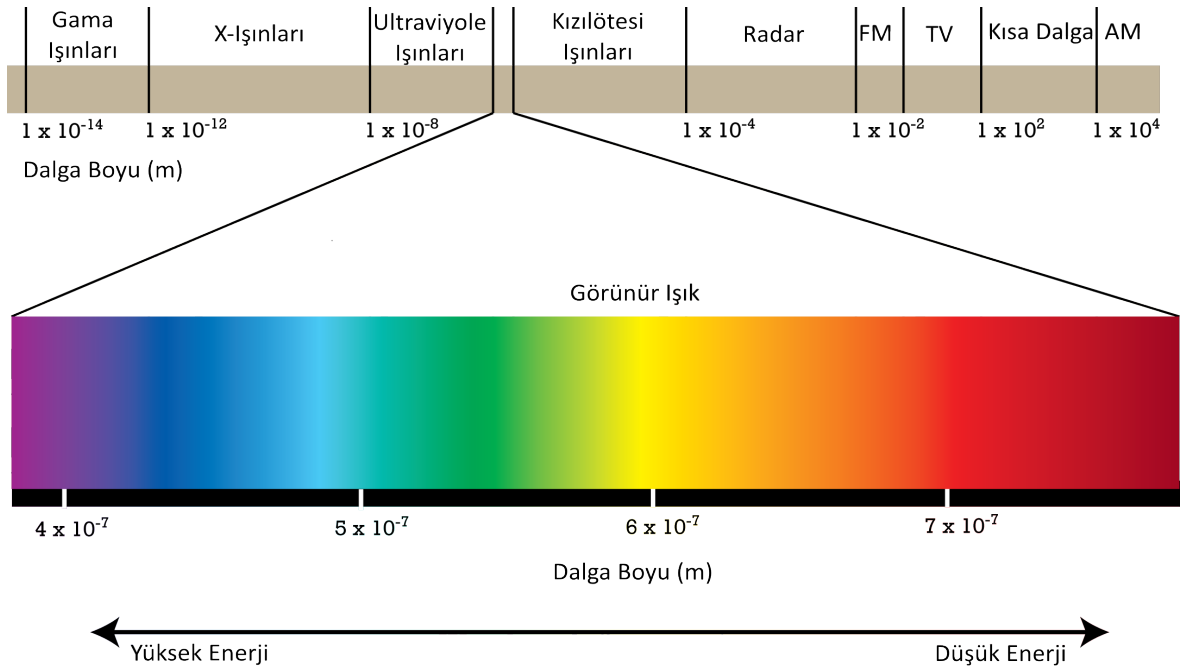
Bölüm 5'e geçildiğinde şu ana kadar anlatılan tüm bilgiler kullanılarak bir mikrobolometrenin nasıl modellenebileceği, test edilebileceği ve tezin amacı olan uygulama isterlerine uygun bir mikrobolometre tasarımının nasıl yapılabilceği gösterilmiştir. Bölümün devamında tez kapsamında belirlenen bir uygulama isterine göre tasarım yapılmıştır. Bu tasarımda amorf silikon üzerine yapılacak kaplamada sadece zifir-altın kullanılmamış, zifir-altın kaplamanın üstünlüğünü göstermek için literatürde kullanılan diğer katmanlarla da tasarımlar yapılarak test sonuçları incelenmiştir.

Son bölüm olan Bölüm 6'da tasarımı yapılan amorf silikon ve zifir-altın kaplamanın uygulanabilirliğine değinilmiştir. Sonuçlar zifir-altın kaplamanın yüksek algılayıcılık değerleri sağladığını göstermiştir. Bu bölümde son olarak geliştirilen modelin nasıl daha iyi olabileceğine dair öneriler verilmiştir.

2. KURAMSAL BİLGİLER

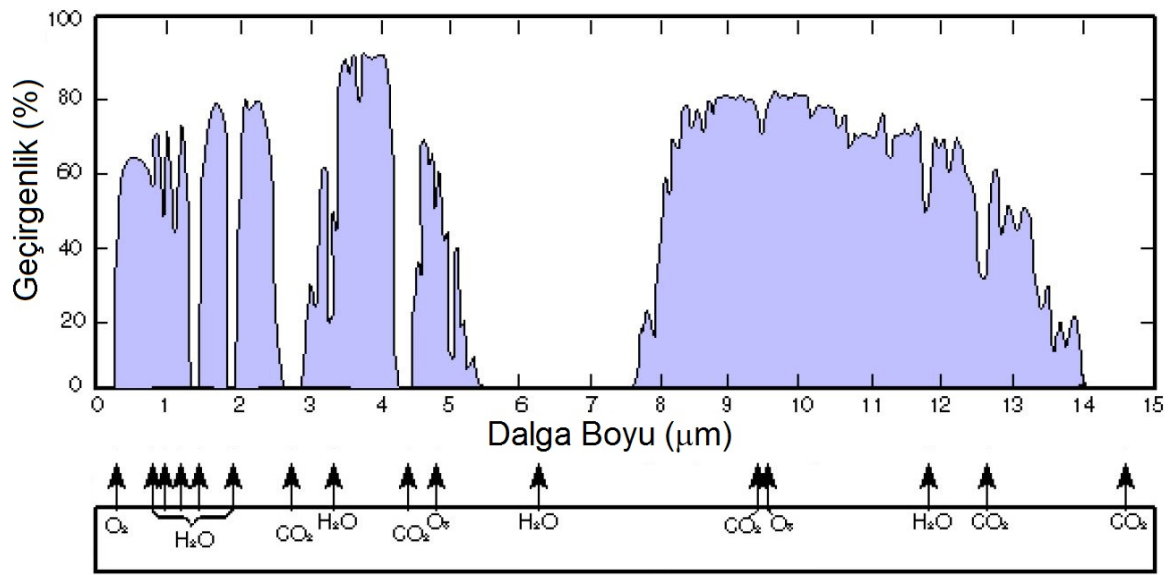
2.1 Kızılötesi Işınım

Kızılötesi radyasyon; görünür spektrumun dışında olan, dalga boyu $0.75 \mu m$ ile $1000 \mu m$ aralığında olan elektromanyetik dalgalardır. Şekil 2.1’de kızılötesi dalga boylarının spektrum üzerindeki aralığı görülebilir. Bu radyasyon tipi 1800 yılında William Herschel tarafından keşfedilmiştir [8]. Herschel, görünür ışıktaki bulunan farklı dalga boylarına sahip radyasyonlardan hangisinin daha yüksek enerji taşıdığını bulmaya çalışırken, gözle görünemeyen bir ışının da enerjisi olduğunu gözlemlemiştir. Bu alandaki çalışmalar ilerleyen yüzyıllarda Rayleigh, Wien ve Planck’ın çalışmaları ile cisimlerin kendi kendilerine yaptıkları ışıma olan Kara Cisim Işıması olayını açıklamıştır. Kara cisim ışıması; yüklü bütün partiküllerin belirli bir frekansta salınım yapmalarından dolayı özgül bir dalga boyunda yaydıkları elektromanyetik ışıdır. Bu ışımanın enerjisi ve frekansı, ışıyan cismin sıcaklığı ve ışıma katsayısı ile belirlenir.



Şekil 2.1: Görünür ışık spektrumu [9]

Kara cisim; üzerine gelen bütün elektromanyetik enerjiyi emebilen, ısı eşitliğe gelene kadar da üzerindeki bütün enerjiyi aktarabilen cisimdir. Böyle bir cisim ancak teorik olup, fiziksel olarak üretilebilen cisimler kısmi kara cisim olarak adlandırılır. Örneğin güneş, enerjisinin neredeyse tamamını radyasyon olarak aktararak bir kara cisim gibi davranır. Sıcaklığından dolayı en yüksek ışınımı görünür spektrumun ortası olan $0.5 \mu m$ bandında yaparsa da geniş bir kızılötesi spektrumda da ışıma yapar. Ancak Dünya'nın atmosferi, içerdiği moleküllerden dolayı gelen ışınların bir kısmının geçişine izin vermez ve bu frekanstaki ışınları emerek ısıya çevirir. Şekil 2.2 ile yeryüzüne ulaşabilen ışınların atmosferden geçiş oranı ve dalga boyları gösterilmiştir. Şekil 2.2 ile de görülebileceği gibi dalga boyları 3 parçaya ayrılmıştır.



Şekil 2.2: Kızılötesi ışık spektrumu [10]

Bunlar;

- Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR): Dalga boyu $0.75 \mu m$ ile $2.5 \mu m$ aralığında olan ışınlardır. Bu dalga boyları standart CMOS işlemi ile üretilebilen inGaAs (İndinyum Galliyum Arsenit) tabanlı sensörlerle rahatlıkla algılanabildiği ve aynı zamanda camdan üretilmiş lenslerden geçebildiği için ucuz bir şekilde üretilebilmektedirler. SWIR dedektörleri genellikle endüstride sıvı algılama, üretim test ve kontrolleri, tanımlama ve güvenlik gibi birçok alanda kullanılabilmektedir.
- Orta Dalga Kızılötesi (MWIR): Dalga boyu $3 \mu m$ - $5 \mu m$ aralığında olan ışınlardır. SWIR algılayıcıların aksine görüntülenen objeden yansıyan ışık yerine, objenin kendi

yaydığı ışınlar algılanır. Bu dalga boylarında kullanılan lensler ve algılayıcılar daha özel teknikler ile üretilmektedir. MWIR algılayıcılar genellikle endüstri ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır.

- Uzun Dalga Kızılötesi (LWIR): Dalga boyu $8\ \mu m$ - $14\ \mu m$ aralığında olan ışınlardır. MWIR algılayıcılar ile benzer özelliklere sahiptir. Ancak sıcaklık algılama aralığı daha geniştir. LWIR algılayıcılar da endüstri ve askeri uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Görüntülenmek istenen hedefin sıcaklık aralığı, bu işlem için kullanılacak kızılötesi dedektörün spektral aralığının seçiminde kilit rol oynar. Belirli bir sıcaklıkta bulunan birim alana sahip kara cisimden yayılan düzlemsel ışınların birim dalga boyu aralığındaki güç dağılımı, Planck kanunu ile açıklanabilir [11].

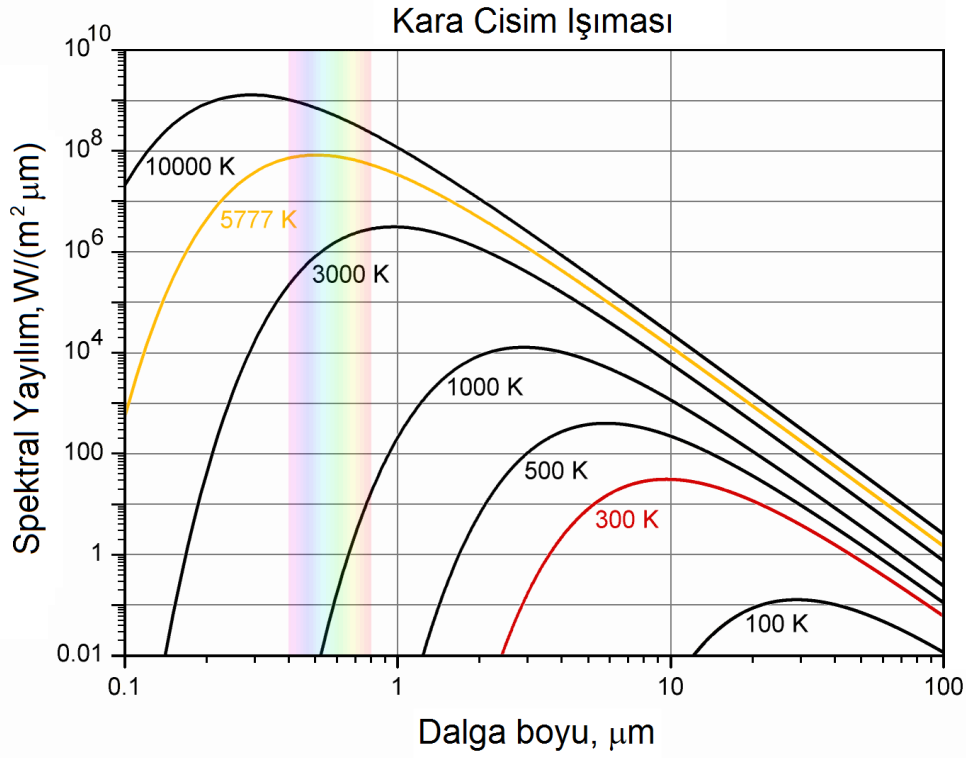
$$M(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (2.1)$$

$M(\lambda, T)$ spektral yayılımı, h Planck sabitini, c ışık hızını, λ dalga boyunu, k Boltzmann sabitini, T ise objenin sıcaklığını belirtmektedir.

λ_{max} en fazla ışıının olduğu dalga boyunu gösterir ve Eşitlik 2.1'in türevinin sıfıra eşitlenmesi ile elde edilir ve sonuç olarak Wien kanunu olarak ifade edilir.

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (2.2)$$

Farklı sıcaklıklara karşı bu objelerin ısıdığı spektrum Şekil 2.3 ile gösterilmiştir. Beklenildiği gibi objelerin ısıdığı en yüksek dalga boyu objenin sıcaklığı arttıkça küçülmektedir. Oda sıcaklığındaki cisimler için en yüksek değer yaklaşık $10\ \mu m$ mertebesindedir. Yani oda sıcaklığı etrafındaki değerleri ölçmesi istenen bir kızılötesi algılayıcı $8\ \mu m$ ile $14\ \mu m$ aralığında (LWIR) en yüksek duyarlılık seviyesine sahip olmalıdır. Buna karşın daha sıcak objeler olan roket, füze, eriyik metalleri algılamak için algılayıcının $3\ \mu m$ - $5\ \mu m$ aralığına (MWIR) hassas olması gerekmektedir.



Şekil 2.3: Obje sıcaklığına göre yaydığı ışımın spektrumu [12]

2.2 Kızılötesi Algılayıcılar

Kızılötesi dedektörler yıllardır endüstride, astronomide, askeri uygulamalarda, sağlık sektöründe, güvenlik sektöründe kullanılmaktadır [13] [14] [15] [16]. Farklı kullanım amaçlarının oluşması kızılötesi dedektörlerin çeşitliliğinin artmasına sebebiyet vermiştir. Kızılötesi algılayıcılar çalışma mekanizmalarına göre soğutmalı foton dedektörleri ve soğutmasız ısı dedektörleri olarak iki ana sınıfa ayrılırlar.

2.2.1 Foton Dedektörleri

Foton dedektörlerinde algılayıcıya gelen fotonlar, algılayıcı içerisindeki elektronlar ile çarpışarak bir elektron hareketi yaratırlar. Bu hareket algılanarak gelen foton ile orantılı bir çıktı yaratılır. Ancak bu yapılarda hassasiyeti arttırarak kızılötesi algılayıcı üretebilmek için algılayıcının 70 Kelvin ve daha altı sıcaklıklara soğutulması gerekmektedir [17] [18]. Bu soğutma işlemleri; dedektörleri pahalı ve büyük yaparken aynı zamanda dedektörün yük-

sek bakım gerektirmesine ve kullanım ömürlerinin kısa olmasına sebebiyet vermektedir. Foton dedektörleri yüksek fiyatına rağmen yüksek performansından dolayı performansının fiyatının önüne geçtiği astronomi, askeri uygulamalar ve medikal uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

2.2.2 Isıl Dedektörler

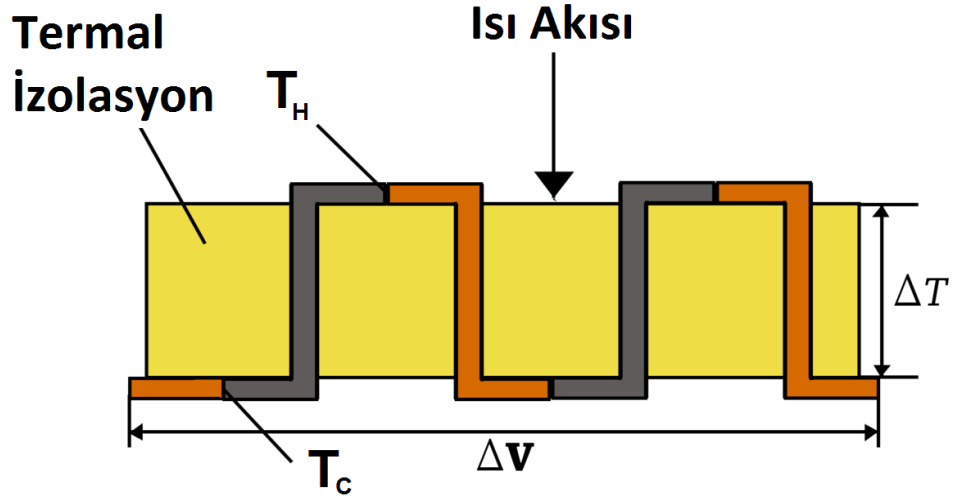
Isıl dedektörlerde görüntülenen objenin sıcaklığından kaynaklanan ışıınım, dedektördeki algılayıcı maddenin sıcaklığını ve bununla birlikte bazı fiziksel özelliklerini değiştirerek elektiriksel bir çıktı verir. Bu sistemlerde kızılötesi ışıma dolaylı olarak algılanır. Dolaylı algılama soğutmalı dedektörlere göre daha yavaş çalışmakta ve sinyal gürültü oranının daha kötü olmasına neden olmaktadır [19] [20]. Ancak termal dedektörlerin büyük ve pahalı soğutma sistemlerine gerek duymaması bu algılayıcıları daha küçük ve taşınabilir, ucuz, bakıma ihtiyaç duymadan uzun süre boyunca kullanılabilecek şekilde üretilebilmesine olanak vermektedir. Bahsi geçen avantajlar soğutmasız dedektörlerin kullanım alanlarını hızlı bir şekilde arttırarak otomotiv, endüstri, gece görüş gibi onlarca askeri ve sivil uygulamalarda kendisine yer bulmasını sağlamıştır. Isıl dedektörler üretim tekniklerine göre iki ana başlığa ayrılırlar.

2.2.2.1 Termopil

Termopil algılayıcılar Seebeck [21] etkisi ile çalışmaktadırlar. Bu etkiye göre iki farklı metalden oluşan bir eklemde, metallerin farklı elektron diziliminden dolayı ortaya çıkardığı bir potansiyel oluşur. Bu potansiyel fark eklem sıcaklığına göre değişmektedir.

$$V_{AB} = a_{AB}\Delta T_{H-C} = (a_A - a_B)(T_H - T_C) \quad (2.3)$$

Burada a_A ve a_B metallerin Seebeck katsayısını, T_H ve T_C sırasıyla eklem sıcaklığını ve okuma yapılan yerin sıcaklığını belirtmektedir. Ancak bu voltaj kaynağının çıkış voltajı az ve empedansı çok yüksek olduğu için bu yapı serilenerek veya paralellenerek kullanılır. Şekil 2.4 ile bir termopil yapısı gösterilmiştir. Bu yapı çoklanarak bir okuma devresi ile birleştirildiği zaman kızılötesi kamera olarak kullanılabilmektedir.



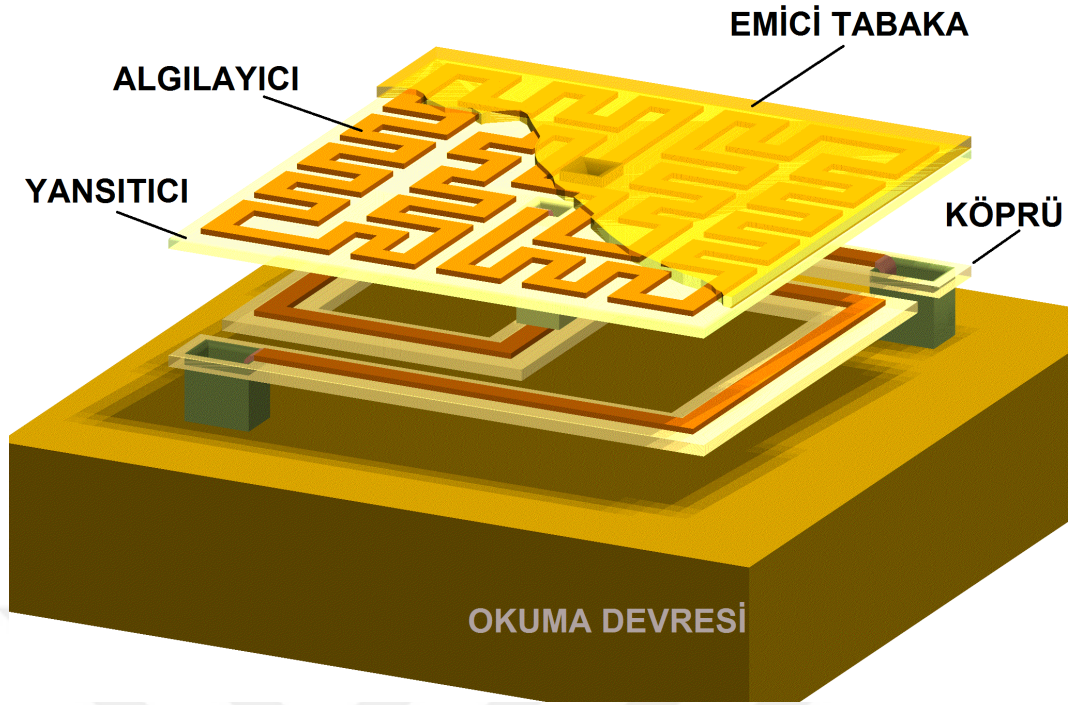
Şekil 2.4: Termopil yapısı [22]

2.2.2.2 Mikrobolometre

Isıl dedektörlerin kızılötesi görüntülemeye en yaygın kullanılan tipi mikrobolometrelerdir. Mikrobolometreler; MEMS yöntemi ile işlenen yongalardan yaratılan algılayıcı bölgeler, destek köprüleri ve okuma devrelerinden oluşan kızılötesi dedektörlerdir. Şekil 2.5 ile standart bir mikrobolometre pikseli görülebilir.

Mikrobolometreler 5 temel parçadan oluşur;

- **Emici Tabaka:** Emici tabaka dedektöre gelen kızılötesi ışınları emerek ısıya çeviren tabakadır. Bu tabaka sayesinde dedektöre gelen birim ışın ile dedektörün daha çok ısınması sağlanır. Emici tabaka bu ısıyı hızlı bir şekilde altında bulunan algılayıcı tabakaya aktarmaktan sorumludur. İdeal emici tabaka istenilen spektrumda kara cisim gibi davranan, ısı iletkenliği sonsuz olan ve aynı zamanda hiç bir kütlesi olmayan maddedir. Ancak fiziksel olarak böyle bir madde olmadığı için bu özelliklere yakın maddeler kullanılmaktadır. Bu konu tezin ilerleyen bölümlerinde detaylandırılacaktır.
- **Algılayıcı:** Isıl dedektörler, algılayıcının ısınması ile fiziksel özelliğini değiştirebilen maddeler aracılığı ile algılama yapar. Mikrobolometrelerde bu fiziksel özellik direnç değişimidir. Algılayıcı tabaka; sıcaklığı ile direnci yüksek oranda değişen maddelerden oluşur. Bu katman değişen direnç ile sıcaklık arasında bağlantı kurarak sıcaklığı



Şekil 2.5: Örnek bir mikrobolometre yapısı [23]

elektriksel bir niceliğe çevirmektedir. Günümüzde en çok kullanılan algılayıcılar VOx ve a-Si tabanlı maddelerdir. a-Si tezin ilerleyen bölümlerinde detaylandırılacaktır.

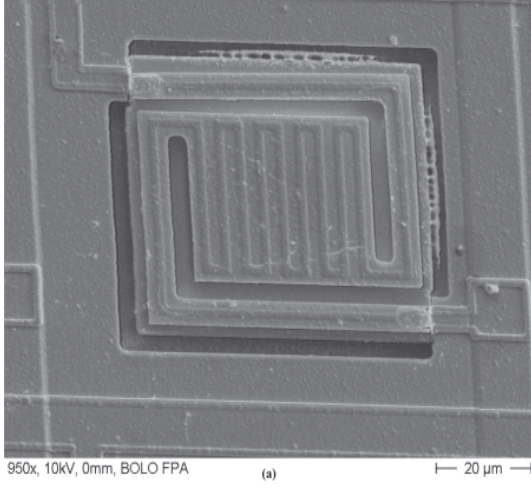
- Destek Köprüleri: Mikrobolometreler genellikle MEMS teknolojisi ile üretilmektedir. Yani içerisinde 3 boyutlu yapıların oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Destek köprüleri de bu teknoloji ile üretilen yapılardır. Bu yapıların görevi algılayıcı tabaka ile okuma devresi arasında ısıl izolasyon sağlarken aynı zamanda elektriksel iletkenlik sağlamaktır. Bu gerekliliğin sebebi okuma devresinde oluşan ısının algılayıcıya gitmesini engellemek ve aynı zamanda radyasyon ile ısınan algılayıcının ısının okuma devresine kaçmasını önlemektir.
- Yansıtıcı Katman: Bu katman okuma devresi ile algılayıcı katman arasında bulunan metal içerikli bir aynadır. Dedektöre gelen kızılötesi ışın emici tabakadan ve algılayıcı tabakadan geçtikten sonra tamamen emilmemiş olabilmektedir. Emilimi arttırmak için geri kalan ışın bu tabakaya çarparak bir kez daha algılayıcı ve emici tabaka içerisinde geçer. Böylelikle hem okuyucu devre ısıtılmamış olmakta, hem de gelen birim ışın ile algılayıcı daha çok ısıtılmış olmaktadır.

Tablo 2.1: Üreticiler ve teknolojileri [24] [25] [26]

Firma	Algılayıcı	Çözünürlük	Piksel Boyutu (μm)	NETD @ 60 Hz
FLIR, ABD	VO _x	160 x 120, 640 x 480	25	35
L-3, ABD	VO _x	320 x 240	37.5	50
	a-Si	160 x 120, 640 x 480	30	50
	a-SiGe	320 x 240, 1024 x 768	17	30-50
BAE, ABD	VO _x	320 x 240, 640 x 480	28	30-50
	VO _x	160 x 120, 640 x 480	17	50
	VO _x	1024 x 768	17	
DRS, ABD	VO _x	320 x 240	25	35
	VO _x	320 x 240	17	50
	VO _x	640 x 480, 1024 x 768	17	
RAYTHEON, ABD	VO _x	320 x 240, 640 x 480	25	30-40
	VO _x	320 x 240, 640 x 480	17	50
	VO _x	1024 x 768, 2048 x 1536	17	
ULIS, FRANSA	a-Si	160 x 120, 640 x 480	25-50	60
	a-Si	640 x 480, 1024 x 768	17	60
MITSUBISHI, JAP.	Si diyot	320 x 240, 640 x 480	25	50
NEC, JAPONYA	VO _x	320 x 240, 640 x 480	23.5	75

- Okuyucu Devre: Bu devre CMOS işlem ile üretilmiş olup amacı algılayıcı tabakanın direnç değişimini ölçüp bu bilgiyi dışarıya iletmektir. Okuma devresi genellikle bir Wheatstone köprüsünden veya voltaj bölücü devresinden ve analog-dijital çeviriciden oluşmaktadır. Algılayıcının direnç değişimi köprü dengesini bozmakta veya voltaj bölücü devresinde çıkış voltajını değiştirmektedir. Bu değişim analog-dijital çevirici ile ölçülüp sayısallaştırılmaktadır. Böylelikle dedektöre gelen kızılötesi ışın sayısal bir niceliğe çevirilir.

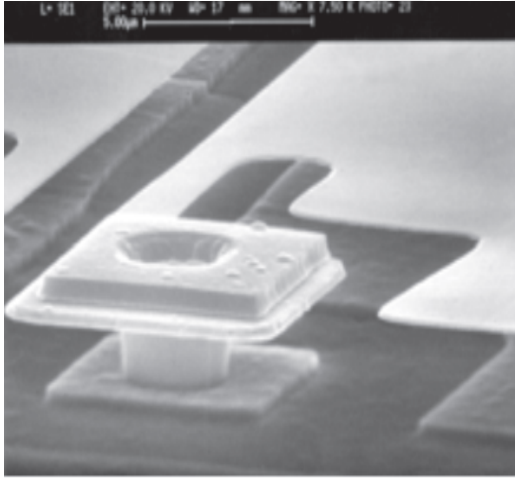
Günümüzde piyasada bulunabilen dedektörlerde piksel boyutları $25 \mu m \times 25 \mu m$ olan 640x480 çözünürlükte NETD (Gürültü Eşlenik Sıcaklık Farkı) değeri 50 mK değerlerine inen sensörler bulunabilmektedir. Çalışmalar ilerledikçe $17 \mu m \times 17 \mu m$ boyutlarında 20 mK NETD değerlerinde 1024 x 768 ve daha üstü çözünürlükte kızılötesi algılayıcılar üretilmeye başlanmaktadır [24] [25] [26]. Genellikle askeri amaçlarla üretilen ve sonradan endüstride kullanılan mikrobolometrelerin dünyadaki baş üreticileri ve teknolojileri Tablo 2.1 ile gösterilmiştir. Şekil 2.6 ile ise elektron mikroskopu altında mikrobolometre yapıları gösterilmiştir.



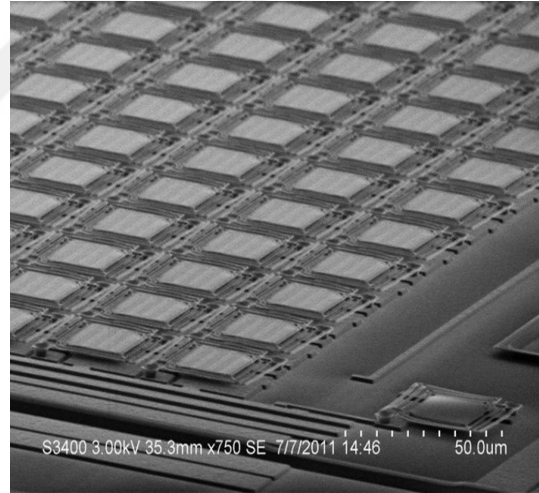
(a) 1 pikselin görünümü



(b) 25 pikselin görünümü



(c) Destek köprüsünün görünümü



(d) Birçok pikselin görünümü

Şekil 2.6: Örnek bir mikrobolometrenin elektron mikroskobu görüntüleri [27] [28]

2.3 Mikrobolometre Performans Parametreleri

Mikrobolometrelerin elektriksel yapısının ve ısı dengesinin modellenmesi için bazı performans parametrelerinin tanımlanması gerekmektedir. Bunlardan en önemlileri; mikrobolometrenin ısı ile direnç değişimi, mikrobolometre ile okuma devresi arasındaki ısı iletkenlik, mikrobolometre katmanlarının toplam ısı kütlesi ve farklı mikrobolometreleri karşılaştırmak için gerekli olan algılayıcılık değeridir.

2.3.1 Direnç Sıcaklık Katsayısı (TCR)

Maddelerin direnci sıcaklık ile değişiklik gösterir [29]. Bu değer

$$R(T) = R_i(1 + \alpha\Delta T) \quad (2.4)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada R_i , maddenin T_i sıcaklığındaki direncini, $\Delta T = T - T_i$ sıcaklık farkını, α ise maddenin TCR değerini göstermektedir. Bu denklemden TCR değeri çekildiği zaman şu ifade elde edilir:

$$TCR = a = \frac{1}{R} \times \frac{dR}{dT} \quad (2.5)$$

Metallerde bu değer + değerlidir [30]. Artan sıcaklıkla beraber serbest taşıyıcı elektronların birbirleri ile yaptıkları çarpışmalar artarak direncin yükselmesine sebep olur. Yarıiletkenlerde ise bu olay tam tersi şekilde gözlenir ve üssel bir ilişki içerir ve yarıiletkenlerin direnci şu şekilde hesaplanabilir:

$$R(T) = R_i e^{\frac{E_A}{kT}} \quad (2.6)$$

Eşitlikte E_A aktivasyon enerjisini, yani bant aralığının yarısını, k ise Boltzmann sabitini göstermektedir. Direnç değeri Eşitlik 2.5 içine yazılır ise yarı iletkenler için TCR değeri şu

şekilde bulunur:

$$a = -\frac{E_A}{kT^2} \quad (2.7)$$

2.3.2 Isıl İletkenlik (G_{th})

Daha önceden de bahsedildiği gibi mikrobolometreler destek köprüleri ile oluşturulmuştur. Bu yapıların amacı algılayıcı tabakayı, okuma devrelerinden izole ederek sensörün performansını arttırmaktır. İzolasyonun seviyesi termal iletkenlik ile belirlenir ve bu değer ne kadar düşük olursa izolasyon o kadar iyi yapılmış olur. Mikrobolometre içerisinde algılayıcının termal olarak bağlı olduğu noktalar; destek köprüsü, hava akımı ve radyasyondur. Ancak mikrobolometreler vakum ortamında üretildiğinden hava akımı yok sayılabilmektedir. Destek köprülerinin termal iletkenliği şu eşitlikle gösterilebilir:

$$G_{köprü} = \sigma \frac{A}{L} \quad (2.8)$$

Burada σ maddenin termal iletkenlik katsayısını, A ısı akısının ilerlediği kesit alanını, L ise ilerleme eksenindeki uzunluğu belirtmektedir.

T sıcaklığındaki bir gri cismin etrafı, mutlak sıfır uzayı ile çevrili olan bir ortamda yaydığı radyasyon için termal iletkenlik ise [31]:

$$G_{rad} = 4A_D\eta\sigma T^3 \quad (2.9)$$

olarak gösterilebilir. Bu eşitlikte A_D ışıyım yapan ya da ışıyı emen algılayıcı yüzeyin alanını, η bu yüzeyin kara cisim katsayısını, σ Stephen-Boltzmann sabitini ve T ise cismin sıcaklığını göstermektedir.

Bu iki etki mikrobolometre algılayıcısının ısınmasını ve soğumasını etkilemektedir. Kendisinden sıcak bir objeye doğru bakan algılayıcı kara cisim ışıması ile ısınacaktır. Bu ışıyı

destek köprüleri üzerinden okuma devresine doğru iletim yolu ile kaybedecek, ek olarak radyasyon ile de etrafına saçarak kaybedecektir. Isınan algılayıcı kendisinden daha soğuk bir objeye baktığında ise o objeye doğru kara cisim ışıması ile ısı aktaracak ve soğumaya başlayacaktır. Ancak aynı zamanda iletim ve radyasyon ile mikrobolometre ısınıp kaybetmeye devam edecektir. Bu kayıplar sürtünme enerjisi gibi sistemi olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Bu iki iletkenlik değeri paralel dirençler gibi toplanabilir ve mikrobolometrenin toplam ısı iletkenliği aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$G_{th} = G_{köprü} + G_{rad} \quad (2.10)$$

2.3.3 Isıl Zaman Sabiti (τ)

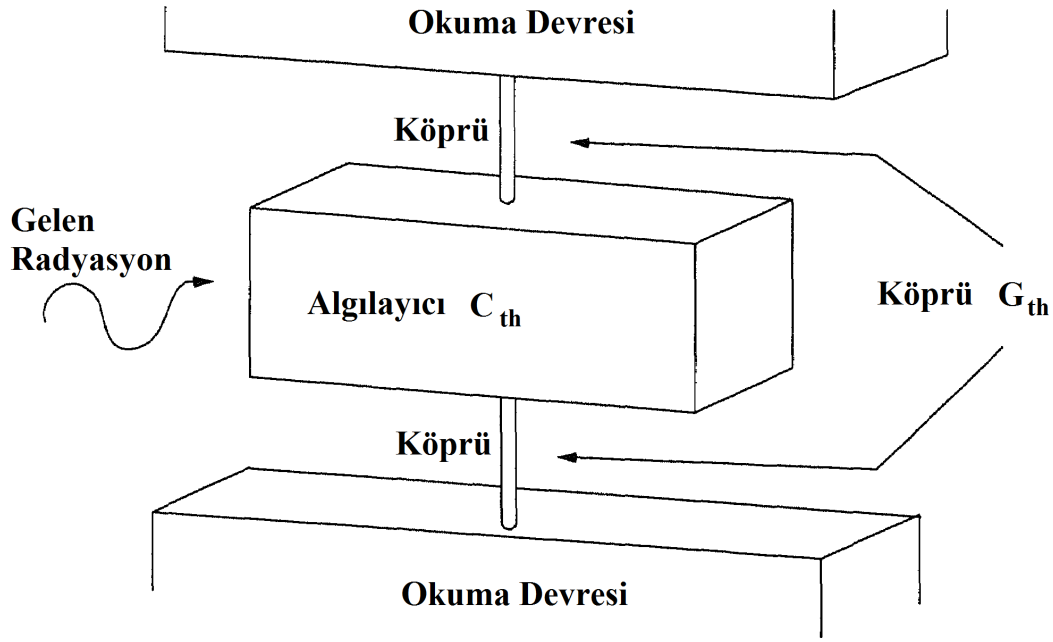
Isıl zaman sabiti mikrobolometre yapısının ne kadar hızlı ısınıp soğuyabildiğinin ölçüsüdür ve şu şekilde gösterilebilir:

$$\tau = \frac{C_{th}}{G_{th}} \quad (2.11)$$

Burada C_{th} maddenin öz ısınıp ya da diğer adıyla ısı kapasitesini belirtmektedir. Bu değer maddenin sıcaklığının 1 birim artması için alması gereken enerji olarak açıklanabilir [32] ve şu şekilde tanımlanır:

$$C_{th} = mc_s \quad (2.12)$$

Burada m maddenin kütlesini, c_s ise maddenin öz ısı sabitini gösterir. Bir dedektörün ısı zaman sabiti ne kadar yüksek ise algılayıcının ısınması veya soğuması o kadar uzun süre alacaktır. Bunun sonucu olarak görüntüleme yapılan obje hareket ederse algılayıcı ısınmak için yeterli süreyi bulamayacak ve obje sıcaklığını yanlış gösterecektir. Önemli bir tasarım parametresi olan ısı zaman sabiti uygulama tarafından belirlenmelidir. Ancak genel kural olarak görüntüleme yapılmak istenen kare hızının 3 kat altında ısı zaman sabitine sahip olmak yeterli görülmektedir. Şekil 2.7 ile mikrobolometre yapısı ısı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Bir algılayıcının ısı akışları

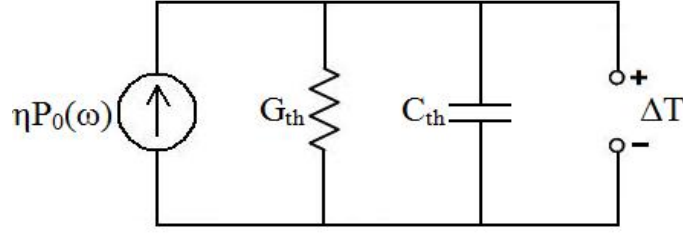
2.3.4 Tepkisellik (R)

Dedektöre gelen birim radyasyon güç için, dedektörde oluşan sinyal değişimine "Tepkisellik" denir. Çıkış sinyali voltaj ise, gelen 1W'lık güç için dedektör çıkışındaki voltaj değişimini, bu sinyal akım ise gelen 1W'lık güç için dedektör çıkışındaki akım değişimini gösterir.

$$R_V = \frac{\text{Çıkış Voltajı Değişimi}}{\text{Dedektöre Gelen Güç}} = \frac{\Delta V}{P_o} \quad (2.13)$$

$$R_I = \frac{\text{Çıkış Akımı Değişimi}}{\text{Dedektöre Gelen Güç}} = \frac{\Delta I}{P_o} \quad (2.14)$$

Termal devreler elektrik devreleri ile benzerlik gösterir ve çözümleme kolaylığı için aynı yöntemler uygulanabilir. Isıl iletkenlik, elektriksel iletkenlik, ısıl kütle, elektriksel kapasitans ve dedektöre gelen modüle edilmiş ışın η katsayısı ile emilir ise ω frekansı ile salınan akım kaynağı gibi düşünülebilir. Şekil 2.8 ile gösterilen devre tek bir mikrobolometre dedektörünün elektriksel olarak modellenmiş halini göstermektedir.



Şekil 2.8: Isıl devrenin elektriksel benzetimi

Bu devreden çıkıştaki sıcaklık değişimi ΔT şu şekilde yazılabilir:

$$\Delta T = \frac{\eta P_o}{G_{th} \sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} \quad (2.15)$$

Bu eşitlikte η dedektörün emilim katsayısını, P_o gelen kızılötesi radyasyonun gücünü, G_{th} ısı iletkenliği, ω görüntülenen objenin sıcaklık değişim frekansını ve son olarak τ ise mikrobolometre dedektörünün ısı zaman sabitini göstermektedir.

Sıcaklık değişimi ile çıkış voltajı arasındaki ilişkiyi bulmak için I_d akımı ile beslenen dedektörde Eşitlik 2.5'te ΔR yerine $a R_d \Delta T$ konur ise:

$$\Delta V = I_d \Delta R = I_d a R_d \Delta T \quad (2.16)$$

eşitliği elde edilir. Burada R_d dedektör direncini göstermektedir ve bu eşitlikten ΔT çekilip Eşitlik 2.15'te yerine yazılır ise R_V voltaj tepkiselliği bulunmuş olur.

$$R_V = \frac{\Delta V}{P_o} = \frac{\eta I_d a R_d}{G_{th} \sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} \quad (2.17)$$

Voltaj tepkiselliğine paralel olarak belirli bir potansiyel (V_d) ile beslenen bir dedektörde sıcaklık değişimi ile çıkış akımı değişimi arasında şöyle bir bağlantı kurulabilir:

$$\Delta I = \frac{V_d}{R_d} - \frac{V_d}{R_d - a R_d \Delta T} \approx -\frac{V_d}{R_d a \Delta T} \quad (2.18)$$

Bu eşitlikten ΔT çekilerek çıkan sonuç 2.15 eşitliğinde yerine konursa akım tepkiselliği şu şekilde bulunabilir:

$$R_I = \frac{\Delta I}{P_o} = \frac{\eta V_d a}{G_{th} R_d \sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} \quad (2.19)$$

Eşitlik 2.17'den ve Eşitlik 2.19'dan görülebileceği gibi yüksek tepkisellik elde edilmek istenirse mikrobolometre yapısının yüksek TCR değerine ve çok düşük ısı iletkenliğe sahip olması gerekmektedir. Bu yüzden destek köprülerinin izolasyonu olabildiğince sağlayacak şekilde dizayn edilmesi gerekmektedir. Isıl zaman sabiti ise tepkiselliğe etkisini, görüntülenen objenin hızlı değiştiği yani ω değerinin yüksek olduğu senaryolarda göstermektedir. Özet olarak ideal mikrobolometrenin en düşük ısı iletkenliğe, en düşük ısı kütleye ve en yüksek TCR değerine sahip olması gerekmektedir.

2.3.5 Gürültü Kaynakları

Gürültü, bütün algılama sistemlerinde mevcut olan, bilgi çıkışında sonuç olarak görülebilen bir veya birden fazla etkinin sebep olduğu rastgele salınımlardır. Kızılötesi dedektörlerde gürültünün oluşabileceği noktalar gelen ışının kendisi, algılayıcı ve elektronik devrelerin kendisidir. Ancak mikrobolometrelerde en etkini algılayıcıdaki gürültülerdir.

Bazı gürültü kaynakları devrenin çalışma frekansından bağımsız olarak ortaya çıkabilir ve beyaz gürültü olarak adlandırılırlar. Johnson gürültüsü, ısı gürültü ve arka plan salınım gürültüsü bunlardan birkaçıdır. Beyaz gürültünün aksine frekansa bağlı gürültü kaynakları da vardır. Pembe gürültü olarak adlandırılan bu gürültü kaynaklarından bazıları $1/f$ gürültüsü ve alternatif akım şebeke gürültüsüdür.

2.3.5.1 Johnson Gürültüsü

Zaman zaman Johnson-Nyquist gürültüsü olarak adlandırılan bu etki iletken ortamın içerisinde bulunan yük taşıyıcılarının hareketinden oluşur. Bu hareket sıcaklık ile etkilenir ve iletken maddenin direncinde rastgele salınımlar meydana getirir. Meydana gelen direnç değişimi beraberinde mikrobolometre içerisinde kullanılan algılayıcı tabakanın üzerindeki gerilimi değiştirerek hatalı sonuçlar okunmasına sebebiyet verir. Johnson gürültüsünün sebep olduğu voltaj değişiminin RMS değeri şu eşitlikle hesaplanır [29]:

$$\delta V_j = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (2.20)$$

Burada Δf ölçüm yapılan bant genişliğini, k ise Boltzmann sabitini göstermektedir. Johnson gürültüsü sıcaklık ile etkilendiğinden bu gürültüyü azaltmanın yolu sıcaklığı azaltmaktır. Mikrobolometreler soğutmasız düşük güçlü cihazlar olduğundan soğutma sistemleri kullanılamasa da özel uygulamalar için termoelektrik veya gazlı soğutma sistemleri kullanılabilir. Beklenildiği gibi algılayıcı beslemesi ile ya da görüntülediği obje aracılığı ile algılayıcı tabaka ısındığı zaman gürültüsü de artacaktır. Ancak Eşitlik 2.15 ile görülebileceği gibi sıcaklık değişimi gelen güç ve termal iletkenlik ile orantılıdır. Mikrobolometre sistemlerinden gelen güç nanowatt mertebelerinde iken ısı iletkenlik $10^{-7} \frac{W}{K}$ seviyelerindedir. Sonuç olarak algılayıcının sıcaklığı 1K civarında değişecektir. Bu değişim oda sıcaklığında olur ise yaklaşık %0.3 oranında olacaktır. Eşitlik 2.20 ile görülebileceği Johnson gürültüsü sıcaklığın kökü ile orantılı olduğundan gürültü yaklaşık %0.17 oranında artacaktır. Bu artış diğer gürültü kaynaklarının altında kalacağı için sıcaklığın Johnson gürültüsüne etkisi, mikrobolometrelerde yok sayılabilmektedir. Ancak algılayıcılarda kullanılan materyallerin dirençleri genellikle $10^6 - 10^4 \Omega$ mertebesinde olduğundan direnç değerlerinin olabildiğince küçülmesi Johnson gürültüsünü hatırı sayılır bir şekilde azaltacaktır.

2.3.5.2 Isıl Gürültü

Isıl salınım; iki madde arasındaki ısı transferinden meydana gelmektedir. Bu salınım toplam ısı transferinin sıfır olduğu aynı sıcaklıktaki iki cisim arasında bile oluşabilmektedir [33]. İletim ve hava akımı ile oluşan ısı transferinde ısı gürültü, ışıma ile ısı transferinde ise arka plan gürültüsü oluşmaktadır. Ancak mikrobolometreye gelen radyasyon enerjisi çok küçük olduğundan, arka plan gürültüsü ısı gürültünün yanında kolaylıkla ihmal edilebilir. Bu gürültünün temel sebebi ise ısı iletimine katılan parçacıkların rastgele salınımıdır. Mikrobolometrenin çalışabilmesi için ısı iletim şart olduğundan, ısı gürültü bu algılayıcının hassaslığında limit değer olarak kabul edilir. Isıl salınımın RMS değeri şu eşitlik ile gösterilmektedir [29]:

$$V_{isl}^2 = \left(\frac{4kT_{piksel}^2 \Delta f}{G_{th} \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \right) V_{piksel}^2 TCR^2 \quad (2.21)$$

Burada G_{th} mikrobolometre yapısının ısı iletkenliğini, Δf beyaz gürültü yapısında olan bu gürültünün hangi frekans aralığında hesaplandığını, τ mikrobolometrenin ısı zaman sabitini, V_{piksel} algılayıcı katman üzerindeki potansiyel farkı göstermektedir.

2.3.5.3 1/f Gürültüsü

1/f gürültüsünün sebebi günümüzde tam anlamıyla çözülmüş olmasa da varlığı ve değeri deneysel çalışmalar ile belirlenebilmektedir. Değerini frekansla ters orantılı bir şekilde, materyal direncindeki değişim olarak göstermektedir. Bu değer materyale uygulanan besleme akımı veya voltajına, materyalin cinsine ve mekanik özelliklerine bağlı olsa da [34], materyaller arasında oluşan yüksek dirençli temaslar diğer bileşenlerden daha etkin olmaktadır [29].

1/f gürültüsü dedektöre gelen ışıktan bağımsız olarak meydana gelmekte ve düşük frekanslarda dedektör direncinde salınımlar yaratmaktadır. Bu etkiyi azaltmak için dedektör çıkış sinyali yüksek geçirgen filtre ile süzölebilmektedir. Bu gürültüyü açıklayan tam bir matematiksel denklem bulunmamakla birlikte deneysel çalışmalar sonucunda 1Hz bandında gürültü voltajının ortalama karesel değerini bulmak için aşağıdaki gibi bir eşitlik kullanılabilmektedir [33].

$$V_{1/f} = \sqrt{\frac{(V_B R)}{R_L + R})^2 k_f}{f^{\sim 1}} \quad (2.22)$$

Bu eşitlikte k_f Hoore parametresini, V_B dedektörün besleme voltajını R_L ve R sırası ile bölücü direnci ve dedektör direncini göstermektedir.

Sonuç olarak toplam RMS gürültüsü farklı gürültü bileşenlerinin karelerinin toplamının kökü olarak bulunabilir:

$$V_{Toplam\ Gürültü} = \sqrt{V_{Johnson}^2 + V_{isl}^2 + V_{1/f}^2} \quad (2.23)$$

2.3.6 Gürültü Eşlenik Güç (NEP)

Dedektöre gelen ışının gücünün, dedektörün RMS gürültü değerine eşit olduğunu noktaya gürültü eşlenik güç (NEP) denir. Birimi "Watt" olup aşağıdaki eşitlik ile gösterilir. Bu değerin küçük olması dedektör çıkışındaki gürültünün de küçük olduğunu göstermektedir.

$$NEP = \frac{V_{Toplam\ Gürültü}}{R_V} \quad (2.24)$$

2.3.7 Algılayıcılık (D^*)

Algılayıcılık, farklı dedektör boyutuna, gürültü miktarına ve yenileme hızına sahip dedektörleri karşılaştırmak için kullanılan çok önemli bir parametredir. Birimi " $cm\sqrt{Hz}/W$ " olup aşağıdaki eşitlik ile gösterilebilir. Tez kapsamında lens kullanımı öngörülmediğinden performans karşılaştırmaları bu değer ile yapılmıştır.

$$D^* = \frac{R_V \sqrt{A_D B}}{V_{Toplam\ Gürültü}} = \frac{\sqrt{A_D B}}{NEP} \quad (2.25)$$

Burada R_V dedektörün voltaj tepkiselliğini, A_D algılayıcının yüzey alanını, B ise algılayıcılık ölçümünün yapıldığı bant genişliğini göstermektedir. NEP ve NETD değerlerinin aksine algılayıcılık değerinin yüksek olması istenen bir durumdur. Bu değer LWIR mikrobolometreleri için 10^8 mertebesindedir.

2.3.8 Gürültü Eşlenik Sıcaklık Farkı (NETD)

NETD değeri; bir kara cismin sıcaklığından kaynaklanan sistemin çıkış değerinin, sistemin toplam RMS gürültü değerine eşit olduğu noktadır. Birimi K ve gösterimi aşağıdaki gibidir [33]:

$$NETD = \frac{(4F^2 + 1)V_{Toplam\ Gürültü}}{R_I \gamma A_D (\Delta P / \Delta T)_{\lambda_1 - \lambda_2}} \quad (2.26)$$

Bu eşitlikte F kullanılan lensin ve hedef görüntünün odak oranını, R_I dedektörün akım tepkiseliliğini, γ kullanılan lensin ışık geçirgenliğini, A_D aktif dedektör alanını, $(\frac{\Delta P}{\Delta T})_{\lambda_1 - \lambda_2}$ ise $\lambda_1 - \lambda_2$ spektrumu içerisinde T sıcaklığındaki birim alandan yayılan ışıının gücünün değişimidir.

NETD içerisinde bütün algılama mekanizmasının performans parametrelerini barındırdığı için ısı dedektörlerin karşılaştırılmasında önemli bir rol oynar. Düşük NETD değeri, dedektörün gürültü tabanının düşük olduğunu ve daha küçük ısı değişimleri algılayabileceğini belirtmektedir.



3. AMORF SİLİKON

Hidrojenlendirilmiş amorf silikon (a-Si:H) birçok optik uygulamada kullanılabilir. İlk defa 1969 yılında W.E. Spear ve P.G. LeComber tarafından üretilmiş [35] ve ilk defa 1976 yılında D. Carlson tarafından transistör üretiminde kullanılmıştır [36]. Günümüzde ince film transistör üretiminde, büyük boyutlarda aktif matris LCD üretiminde, güneş panellerinde ve çeşitli görüntüleme cihazlarında kullanılmaktadır [37] [38] [39].

3.1 Silikonun Atomik Yapısı

Silikon monokristal, polikristal, mikrokristal ve amorf yapı gibi birçok formda bulunabilmektedir. Monokristal yapıda bütün atomlar dörtyüzlüsel yapıda ve her atom dört bağ yapacak şekilde konumlanmıştır. Monokristal yapılar sağlam bağlara, düzgün kristal geometrisine ve hiç bir tane sınırına sahip değildir. Polikristaller ise milimetre boylarındaki birçok monokristalin tane sınırı ile birleşmesine denir. Bu birleşme noktalarında kristallerin oryantasyonu değişebilir. Bu yapıda sınırlar kırılmalıdır ve kristal yapısı düzgün değildir. Mikrokristal yapısı ile polikristal yapısı aynı ancak mikrokristal yapısı mikrometre boylarındaki monokristallerin birleşmesinden oluşmuştur. Şekil 3.1 ile silikonun çeşitli formları incelenebilir.



Şekil 3.1: Silikon atomunun çeşitli şekillerde bağlanması

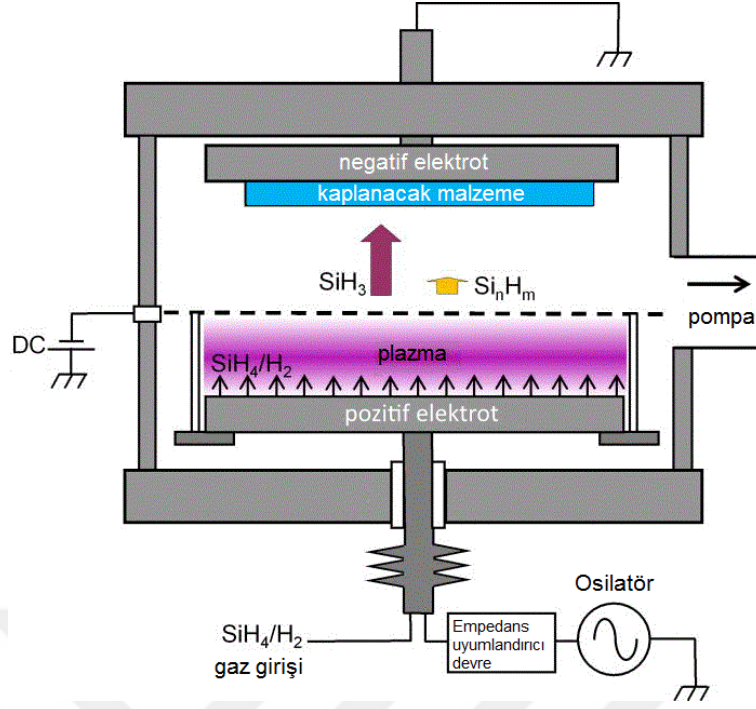
Amorf silikon yapıda ise atomik yapının düzgün olmaması diğer yapılardan ayrılmasına sebebiyet veren en önemli özelliktir. Bu düzensizlik atomlar arası bağlarda *sarkıntı bağlar* adında komşu silikon atoma bağlanması gereken 4 bağdan birisinin bağlanamaması duru-

munda oluşur [40]. Bunun sonucunda bir bağı eksik atom, bağ eksikliği olmayan atoma göre dörtyüzlü koordinat ekseninde farklı bir yerde bulunmaktadır. Sarkıntı bağlar gelişigüzel olduğundan kristal yapısı da düzgün olmayan şekilsiz bir yapıda bulunmaktadır. Saf amorf silikon için kusur yoğunluğu çok yüksek olup üretim yöntemine göre $10^{18}cm^{-3}$ ile $10^{20}cm^{-3}$ arasında değişmektedir [41]. Bu yüksek kusur oranı amorf silikonun foto iletken olmasını engellemektedir [42]. Ancak amorf silikon kolay bir şekilde hidrojen ile zenginleştirilip iletkenliği artırılabilirdiğinden genellikle saf olarak kullanılmamaktadır.

3.1.1 PECVD Yöntemi ile Hidrojenlendirilmiş a-Si Üretimi

Bu yöntemde indüksiyon bobini kuvarz biriktirme odasının dışında çalışarak, biriktirme odası içerisinde plazmayı oluşturmaktadır. Kimyasal Buhar Biriktirme yönteminde kullanılan yüksek sıcaklığa karşı, Plazma ile Güçlendirilmiş CVD (PECVD) plazma kullanımı biriktirme işleminin çok daha düşük sıcaklıklarda yapılabilmesini sağlamaktadır. Böylelikle CMOS üretim işlemine uygun sıcaklıklarda malzemeler istenilen kaplama ile kaplanabilmektedir. Kaplanacak malzemenin gaz fazına daha düşük sıcaklıklarda geçebilmesi için sistem genellikle 0.1-3 Torr gibi düşük basınç altında çalıştırılmaktadır. Şekil 3.2 ile PECVD biriktirme odası düzeneği gösterilmiştir.

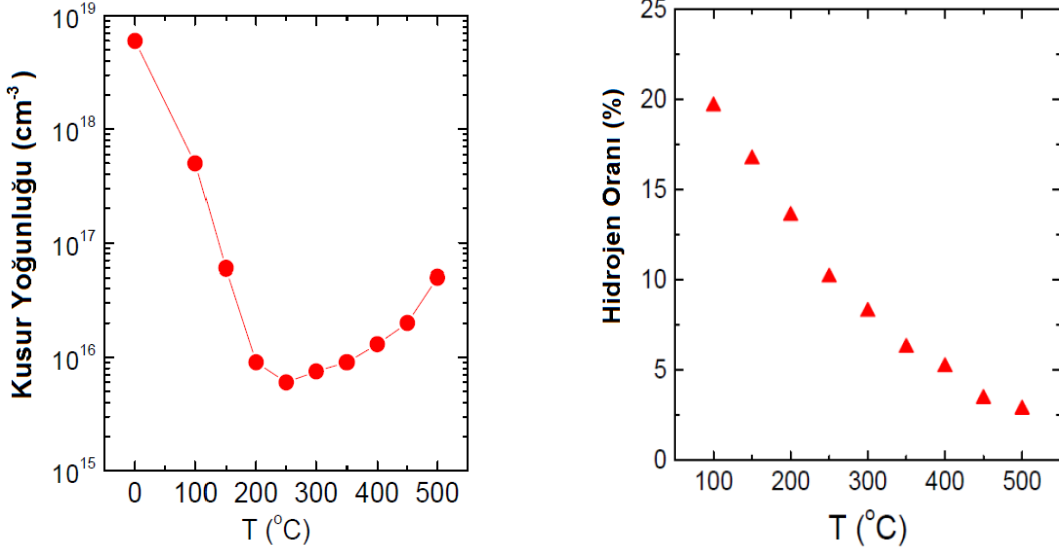
Amorf silikon malzeme üretilirken yapısına hidrojen bağlamak için PECVD sistemleri kullanılmaktadır. Bu işlem ile amorf silikon malzemeye %8 ile %40 oranında hidrojenleme yapılabilir. İşlem sürecinde amorf silikon sıcaklığı değiştirilerek ve giriş gazlarının soygazlar ile seyreltilmesi ile hidrojenlemenin oranı ayarlanabilmektedir. Yapılan çalışmalarla elektronik devreler için kullanılabilen kusur yoğunluklu sonuçların 250 ile 400 santigrat derece arasında elde edilebildiği bulunmuştur [43]. Bu çalışmada en az kusur yoğunluklu amorf silikon yapı için %10 oranında hidrojenlendirmenin kullanılabileceği gösterilmiştir. Şekil 3.3a ve Şekil 3.3b ile bu çalışmanın sonuçları görülebilmektedir. Kısmen düşük sıcaklıklarda üretim yapılabilmesi amorf silikon üretim sürecinin CMOS üretim süreci içine alınabilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.2: PECVD biriktirme odası düzeneği

3.2 Amorf Silikonun Elektriksel Özellikleri

Uzun mesafede düzensiz bir yapı gösteren amorf kristal, birkaç atom çapı içerisinde kristalize silikonun yapısında incelenebilmektedir. Ancak uzun mesafe düzensizliği iletim ve değerlik kuşağının kesin çizgiler ile ayrılmasını engelleyerek, kuşak geçişlerinin yavaş bir şekilde olmasına sebebiyet vermektedir. Yapı içerisindeki düzensizlik arttıkça kuşak arasındaki geçiş daha da yavaşlamaktadır. Buna ek olarak sarkıntı bağlar iletim ve değerlik bandı arasında geçerli enerji bölgeleri oluşturmaktadır. Bu bölgeler serbest taşıyıcıların hapsedilip yeniden oluşmasını sağlayarak malzemenin elektriksel özelliklerini belirlemektedir. Uzayan bant geçişleri ve bant arası enerji seviyeleri taşıyıcı bölgelerinin sürekli değişmesine neden olmaktadır. Bu değişimler iletim anında taşıyıcıların yüksek oranda çarpışmasına ve saçılmasına sebep olmaktadır [44]. Taşıyıcıların hareketliliğindeki bu düşüş sonuç olarak malzemenin iletkenliğini azaltmaktadır. Şekil 3.4a Şekil 3.4b ve Şekil 3.4c ile sırası ile kristal yapıdaki silikonun, saf amorf silikonun ve hidrojenleştirilmiş silikonun kuşak yapısı gösterilmiştir. Malzeme düzensizliği arttıkça kuşak geçişlerinin kesiştiği ve enerji seviyesi olarak yasak bölgelerin kullanılabilir hale geldiği görülmektedir. Saf amorf silikona hidrojen eklenmesi bu düzensizliği azaltmakta ancak bant genişliğini de azalttığından TCR değerini



(a) Biriktirme sıcaklığı ile kusur sayısı arasındaki ilişki [43] (b) Biriktirme sıcaklığı ile hidrojen oranı arasındaki ilişki [43]

Şekil 3.3: a-Si:H üretimi biriktirme çalışmaları

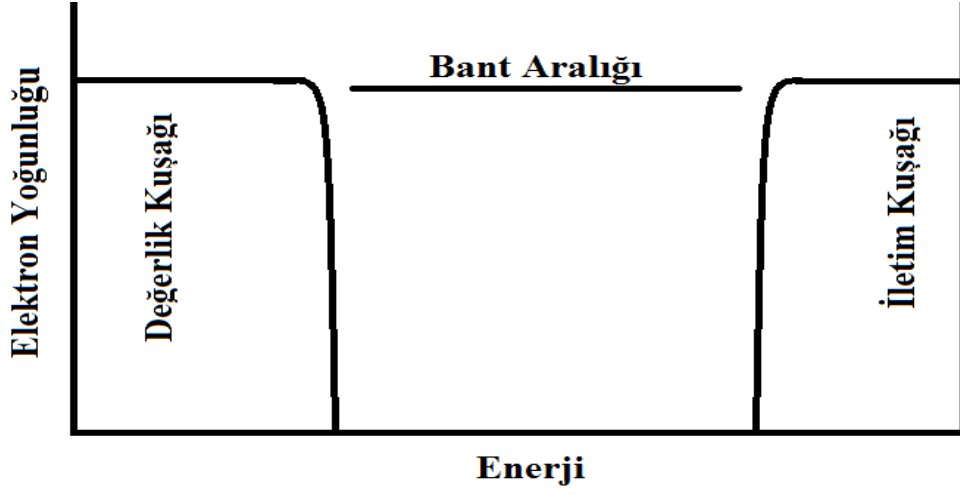
düşürmektedir.

3.2.1 Hidrojenli Amorf Silikonun Elektriksel Özellikleri

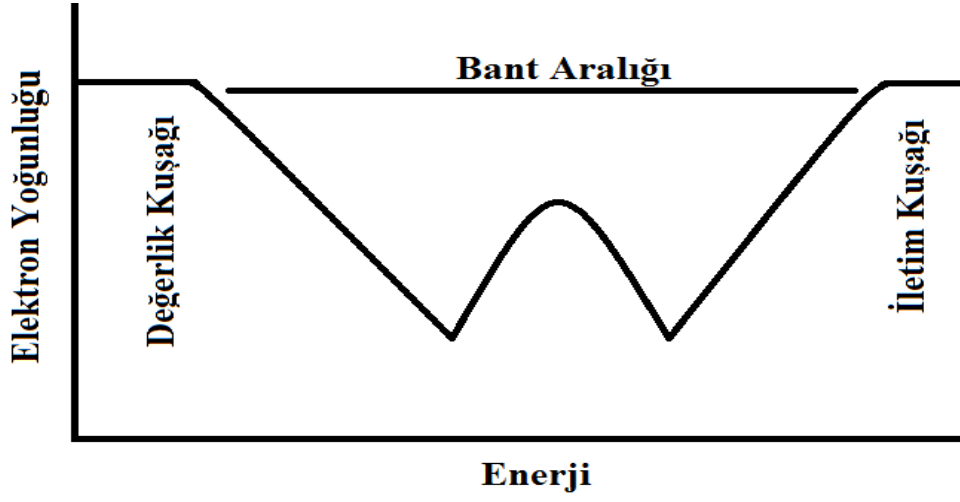
Hidrojenleştirme ile hidrojen atomları sarkıntı yapan boş bağlara bağlandığı için, kusur durumu anında bu sarkıntıların elektriksel aktivitelerini azaltmaktadır [43] [45]. Şekil 3.5 ile hidrojenleştirilmiş amorf silikon yapısı görülmektedir.

Hidrojenleştirme kolaylıkla yapılabildiği için uygulama alanlarında saf amorf silikon yerine kullanılmaktadır. Hidrojenleştirmenin yoğunluğuna göre farklı elektriksel özelliklere sahip amorf silikon katmanları tasarlanabildiğinden birçok farklı uygulama alanında da kullanılabilir.

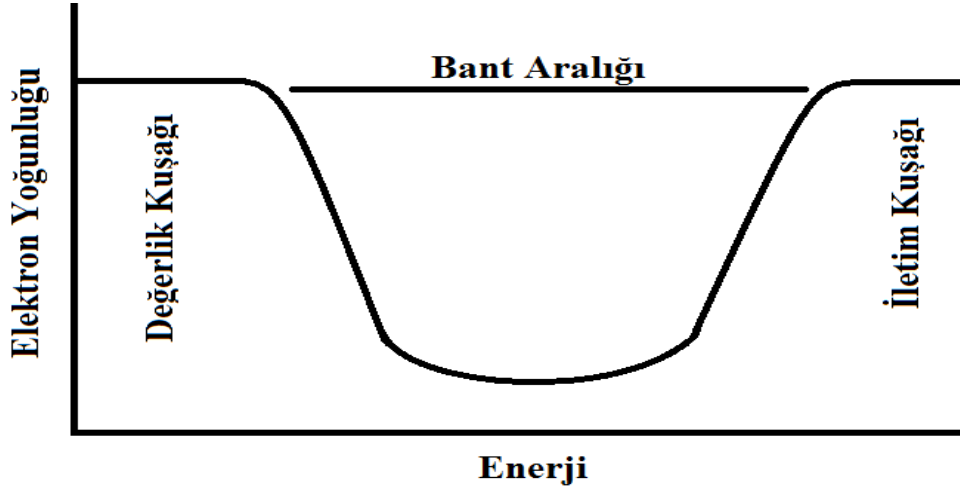
Hidrojenleştirmenin oranına bağlı olarak sarkıntı bağlar azaltılarak kuşak geçişleri daha belirgin hale getirilip, bant ortası enerji yoğunluğu azaltılabilmektedir. 10^{18} cm^{-3} ile 10^{20} cm^{-3} seviyelerinde sarkıntı bağa sahip olan saf amorf silikon hidrojenlendiği zaman yapılan işleme göre yoğunluğu 10^{15} cm^{-3} seviyelerine düşebilmektedir. Böylelikle daha yüksek iletkenliğe sahip bolometreler için kullanılabilir materyaller üretilebilmektedir. Ancak hidrojenleme, aktivasyon enerjisini ve buna bağlı olarak TCR değerini düşürmektedir. Farklı ma-



(a) Kristal silikonun kuşak yapısı

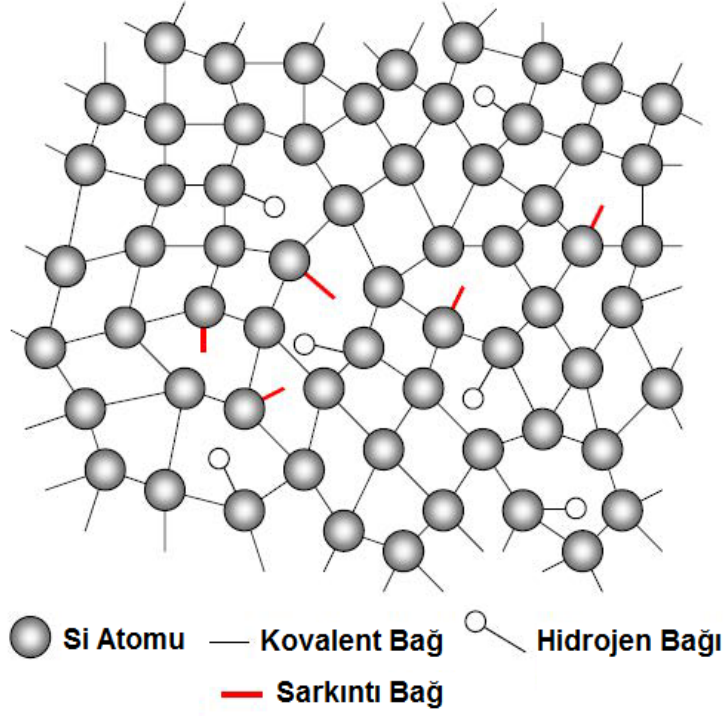


(b) Amorf silikonun kuşak yapısı



(c) Hidrojenli amorf silikonun kuşak yapısı

Şekil 3.4: Çeşitli silikon yapılarının kuşak özellikleri



Şekil 3.5: Sarkıntı bağlara bağlanan hidrojen atomları [44]

teryaller ile yapılan çalışmalardan bazıları Şekil 3.6 ile gösterilmiştir. Burada a-Si:H hidrojenlendirilmiş amorf silikonu, a-Si:H,B hidrojen ve bor ile bağlanmış yapıyı ve son olarak a-GeSi:H ise silikon ile beraber germanyum kullanımından ortaya çıkan materyalleri göstermektedir. Bor katkısının iletkenliği büyük bir oranda arttırdığı ancak aktivasyon enerjisini düşürerek TCR değerinin düşmesine sebebiyet verdiği görülmektedir. Germanyum kullanımında ise malzemenin borlu ve borsuz üretimindeki değerlerinin ortasında bir değere sahip olduğu görülmektedir. Sonuç olarak amorf silikon malzemeler uygulama isterlerine göre birçok farklı yapıda üretilebilmektedirler. Ancak üretim süreçlerinin hassaslığına göre oluşan malzemenin kusur yoğunluğu 10^3 mertebelerinde değişebildiğinden üretim basamakları ayrı bir çalışma konusu olmaktadır. Şekil 3.6 ile literatürde üretilmiş bazı termometre materyalleri ve bu materyallerin karakteristik özellikleri gösterilmiştir. İlgili malzemelerin referansları [46] [47] [48] ile verilebilir.

Termometre Yapısı	E_a , eV	TCR (α/K)	Piksel Boyutu ($\mu m \times \mu m$)	Piksel direnci (Ohm)	Voltaj Tepkiselliği (R_v)	Akım Tepkiselliği (R_i)	Algılayıcılık
VO_x	0.16	0.021	50 x 50	-	2.5×10^7	-	-
$Ge_xSi_{1-x}O_y$	0.32	0.042	50 x 50	7×10^5	1×10^5	-	6.7×10^8
a-Si:H,B	0.22	0.028	48 x 48	3×10^7	10^6	-	-
a-Si:H	0.8-1	0.039	25 x 25	$>10^9$	-	-	-
a- Ge_xSi_yH $Ge_x=0.5$	0.34	0.043	70 x 66	5×10^8	7.2×10^5 *	2×10^{-3}	7.9×10^9
a- $Ge_xSi_yB_zH$ $Ge_x=0.45$, $B_z=0.09$	0.21	0.027	70 x 66	1×10^6	1.2×10^5 *	3×10^{-2}	5.9×10^9
a- $Ge_xSi_yB_zH$ $Ge_x=0.55$, $B_z=0.07$	0.20	0.028	70 x 66	3×10^6	1.8×10^5 *	7×10^{-2}	2×10^9
a- Ge_xSi_yH $Ge_x=0.5$	0.34	0.043	70 x 66	1×10^5	2.2×10^5 *	0.3 - 14	4×10^9

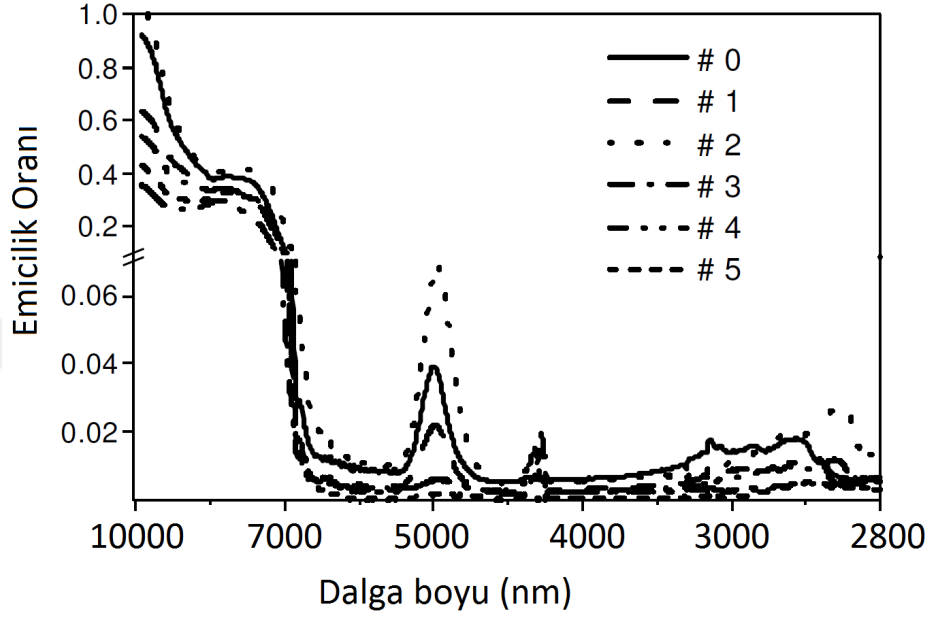
Şekil 3.6: Farklı termometrelerin karakteristik özellikleri

3.3 Amorf Silikonun Optik Özellikleri

Amorf silikon, hidrojenlendirme sonrasında yüksek TCR değerine ve kabul edilebilir seviyelerde yüzey direncine sahip olabilmektedir. Ancak amorf silikonun kızılötesi dedektörlerde kullanılabilmesi için kızılötesi ışığı emebilmesi gerekmektedir. Bu sayede sıcaklığını arttırıp direnç değişikliği yaratabilmektedir. Amorf silikon farklı üretim teknikleri altında farklı fiziksel özellikler gösterse de optik özellikleri hemen hemen tahmin edilebilir olmaktadır. Literatürde bu konu ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır [49] [50]. Yapılan çalışmanın [49] sonunda amorf silikon yapıları termometrelerin 400 nm-900 nm dalga boyu aralığında yüksek sayılabilecek emiciliğe, daha düşük frekanslarda ise 5000 nm haricinde çok düşük

emiciliğe sahip olduğu görülebilmektedir. Şekil 3.7 ile silikonun geniş bir tayftaki emiciliği gösterilmiştir. Çalışma sırasında PECVD yöntemi ile üretilmiş beş ayrı materyal bulunmaktadır. Üretim esnasında plazma sıcaklığı 194 derece ve gaz basıncı 1.5 Torr olarak tutulmuştur. Silikonu hidrojenleştirmek için kullanılan SiH_2 (silan) gazı ortama azot gazı ile farklı seyreltme oranı ile verilmiş ve farklı yapıda silikon kristaller oluşturulmuştur. 0,1 ve 2 numara amorf silikon olarak oluşurken daha düşük hidrojenli üretimler kristalin polikristal yapısında oluşmasını sağlamıştır [49]). Emicilik değerinin 1000 nm ve üzerinde azalması amorf silikonun kompleks dielektrik sabiti ile açıklanabilir. Dielektrik sabitinin sanal değeri, 1000 nm mertebelerinde neredeyse sıfır olduğundan, malzemenin daha düşük frekanslarda kayıpsız dielektrik gibi davranmasına neden olmaktadır. 1 numara ile gösterilen materyal %10 hidrojen oranı ile düşük kusur yoğunluğuna sahiptir. Ancak bu materyal en yüksek emiciliğini 7000 nm-10000 nm arasında gösterirken bu aralıkta sadece %40 emiciliğe sahiptir. Termometrenin kızılötesi algılayıcı olarak çalışabilmesi için 3 μm -15 μm dalga boyu aralığında yüksek emicilik oranına sahip olması gerektiği daha önceki bölümlerde anlatılmıştır.

Sonuç olarak amorf silikon; emici bir tabaka kullanılmadan güneş panelleri gibi uygulamalarda kullanılabilirken, kızılötesi algılayıcı uygulamalarında kendi başına kullanılamamaktadır. Literatür çalışmalarında amorf silikon üzerine kızılötesi emici tabaka olarak SiO_2 ve Si_xN_y bileşiklerinin kullanılabildiği görülmektedir [4]. İki malzemenin de CMOS üretim teknikleri ile uygulanabilmesi üretimi kolaylaştırmaktadır.



Örnek	SiH ₂ -N ₂ Karışımı (%)	Kalınlık (μm)	Kristallik Derecesi (%)	Hidrojen Oranı (%)
# 0	0	0.390	-	17.5
# 1	10	0.394	-	10.8
# 2	20	0.385	-	11.3
# 3	30	0.388	61	2.2
# 4	40	0.402	73	3.3
# 5	50	0.397	82	1.5

Şekil 3.7: Farklı silikon yapılarının kızılötesi emiciliği [49]

4. ZİFİR-ALTIN KAPLAMA

4.1 Zifir-Metal Nedir?

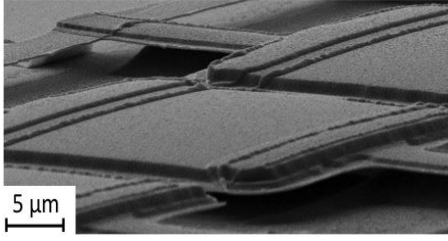
1930 yılında bilim adamı Pfund, vakum içerisinde bizmut elementini ısıya dayanıklı tungsten tel ile eritip soğutulmuş cam üzerine bizmut kaplaması yapmıştır. Beklenildiği gibi bu kaplama homojen ve pürüzsüz bir şekilde üretilmiştir. Deneylerinden birisinde vakum odasına 0.25 Torr civarında soygaz uygulayarak, bu ortamda kaplama yapmayı denemiştir. Ortaya çıkan kaplama insan gözüne şeffaf görünmektedir. Ancak ilginç bir şekilde kızılötesi dalgaya karşı hiçbir yansıma ve geçirgenlik göstermemektedir. Bu kaplama $3\ \mu m$ - $15\ \mu m$ aralığında çok yüksek emiciliğe sahip olup ideal bir kara cisim gibi davranmaktadır. Böylelikle ilk zifir-metal malzeme ortaya çıkmıştır [51].

Pfund vakum ortamında bizmut atomlarının birbirlerini hizaya soktuğunu ve bundan dolayı pürüzsüz, iletkenliği yüksek bir yüzeyin oluştuğunu ileri sürmüştür. Ancak ortama soygaz eklendiği zaman atomların kristal yapısının bozulduğunu, dağınık bir şekilde birbirlerine bağlandığını yorumlamıştır. Böylelikle atomların zayıf bağlarla rastgele birbirlerine bağlandığını, çok pürüzlü ve düşük iletkenliğe sahip bir yapıda olduklarını ortaya çıkarmıştır. İlerleyen çalışmalar altın, bakır, gümüş, kurşun, nikel gibi farklı metallerin de benzer şekillerde sonuç verdiğini göstermiştir [52].

Harris ve ekibi 1950 yıllarında zifir-altın ile ilgili detaylı çalışmalar yapmıştır [53]. Çalışmalar vakum ortamında oksijen bulunmasının altının kızılötesi emiciliğini ciddi şekilde azalttığını, oksijensiz üretilen kaplamanın ise görünür ışıktan $15\ \mu m$ mertebelerine kadar muazzam bir emiciliğe sahip olduğunu ortaya koymuştur.

4.1.1 Zifir-Altın

Altın insanlık tarihinin başından beri değerli bir metal olarak bilinmektedir. Bunun sebebi hem atmosferik koşullara karşı çok dayanıklı olması, hem de dünyada az miktarda bulunmasıdır. Bilindiği üzere altının atom numarası 79'dur ve yüksek miktarda serbest elektrona



(a) Kaplama yapılmamış dedektör



(b) Zifir-altın ile kaplı dedektör

Şekil 4.1: Kızılötesi dedektör üzerine zifir-altın kaplama [55]

(5.9×10^{22}) [54] sahip olduğu için ısıyı ve elektriği çok iyi iletmektedir. Yüzey merkezli kristal yapısına sahiptir ve kristal sabiti 0.407 nm [54] boyutundadır. Yapısında bulunan elektronların ortalama serbest yol uzunluğu 42 nm uzunluğundadır.

Her metal gibi altın da yapısında çok fazla miktarda serbest elektron barındırır. Bu elektronlar; altının yüzeyine gelen elektromanyetik dalgayı emip, yeniden geri yaydığı için altının çok parlak görünmesini sağlarlar. Bu emilim yüzeyin sadece birkaç μm derinliğinde gerçekleştiği için enerji emilemeden geri yansımaktadır. Ancak altın parçacığının fiziksel boyutu elektronların ortalama serbest yolundan daha az olduğu zaman, bu parçacık üzerine gelen elektromanyetik enerjiyi emip geri yansıtmak yerine, ısıya çevirmeye başlamaktadır. Bu etki nanometrik altın parçacığı için görünür ve kızılötesi dalga boylarında olduğundan, altının bu kuşaklarda emilimi çok yüksek olur. Yüksek emilimden dolayı bu spektrumda siyah görünen altın parçacığına "zifir-altın" ismi verilmektedir. Nano boyutlardaki altın parçacıkları kızılötesi ışınları yüksek oranda emebildiğinden kızılötesi dedektörler için muazzam bir kaplama yöntemidir. Zifir-altın yapısının hemen hemen bütün materyallerin üzerine kaplanabilir olması dedektörlerde kullanımını daha da yaygınlaştırmaktadır. Şekil 4.1a ve Şekil 4.1b ile kızılötesi dedektörün üzerinde sadece termometre tabakasını kaplayacak bir biçimde kaplandığı görülmektedir.

4.2 Teorik Yapı

Zifir-altın kaplamanın üzerine gelen kızılötesi ışığı emebilme özelliğini anlayabilmek ve benzetim ortamında bu özelliği matematiksel olarak ifade edebilmek için bir takım teorik bilgilerin sırası ile anlatılması gerekmektedir. Kaplamanın yansıma, emicilik ve geçirgenlik özellikleri için Fresnel denklemleri kullanılmaktadır. Fresnel denklemler; bu değerleri bul-

mak için maddelerin kompleks dielektrik sabitine ihtiyaç duymaktadır. Zifir-altın kaplama, içerisinde nano partiküller bulunan hava veya vakum ortamı olarak nitelendirilmektedir. Bu sebeple kaplamanın ortalama dielektrik sabitinin bulunması gerekmektedir. Literatürde nano partiküllerin belirli bir ortam içinde bulunup, bu ortamın efektif dielektrik sabitinin bulunması için birkaç teorem bulunsa da tez kapsamında işlem kolaylığı ve yeterli doğruluk için Landau-Lifshitz-Looyenga efektif ortam yaklaşımı kullanılmıştır. Efektif ortam teoreminin hesaplanabilmesi için ortam içerisinde bulunan nano parçacığın dielektrik sabitine ihtiyaç vardır. Bu sabitin bulunabilmesi için Drude-Lorentz modeli kullanılmaktadır. Bu model sayesinde dielektrik sabiti maddenin boyutuna, cinsine ve maruz kaldığı elektromanyetik enerjinin frekansına göre hesaplanabilmektedir.

4.2.1 Drude-Lorentz Modeli

Bir elektromanyetik dalga metale çarptığı zaman, metal içerisindeki elektronları elektrik alanı aracılığı ile hareket ettirir. Bu elektrik alanı altındaki elektronun hareketi Eşitlik 4.1 ile ifade edilebilir [56]. Burada $\vec{E}(t)$ harici elektrik alan fonksiyonunu, m elektron kütesini, $\vec{r}$ elektronun yer değiştirmesini, e elektron yükünü ve τ ise kütsel yapıda elektronun iki çarpışma arasındaki süresini ifade etmektedir.

$$e\vec{E}(t) = m\ddot{\vec{r}}(t) + m\tau^{-1}\dot{\vec{r}}(t) \quad (4.1)$$

Gelen dalga belirli bir osilasyon frekansı (ω) olan ışık olduğunda ise $\vec{E}(t)$ ve $\vec{r}(t)$ terimleri periyodik olarak yazılabilir. Böylece $\vec{E}(t) = E(\omega)e^{-i\omega t}$ ve $\vec{r}(t) = r(\omega)e^{-i\omega t}$ eşitlikleri bulunmuş olur. Bu eşitlik Eşitlik 4.1 içerisine koyulur ise Eşitlik 4.2 bulunmuş olur [56].

$$\vec{r}(\omega) = \frac{e\vec{E}(\omega)}{m(\omega^2 + i\omega\tau^{-1})} \quad (4.2)$$

Polarizasyon vektörü ($\vec{P}$) ise duygunluk değeri (χ) ile Eşitlik 4.3 ile gösterilen ilişkiye sahiptir. Duygunluk değeri, materyalin elektrik alanı altında ne kadar polarize olabileceği göstermektedir. Elektrik alanı altında, atom ve elektronlar + ve - çiftler yaratarak ayrılmaktadırlar. Duygunluk değeri fazla olan materyaller dipol oluşturdıkları zaman atom ve

elektron arasındaki mesafe daha uzun olmaktadır [56].

$$\vec{P}(\omega) = \varepsilon_0 \chi(\omega) \vec{E}(\omega) \quad (4.3)$$

Polarizasyon aynı zamanda belirli hacimdeki dipolün toplam momenti olarak da yazılabilir. Yani toplam elektron sayısı (n) kadar 1 elektron yüklü dipolün momentidir [56].

$$\vec{P}(\omega) = -e \vec{r}(\omega) n \quad (4.4)$$

Eşitlik 4.2, 4.3 ve 4.4 birleştirildiği zaman Drude duygunluk değeri ve plazmon frekansı bulunabilir.

$$\chi(\omega) = -\frac{e^2 n}{m \varepsilon_0 (\omega^2 + i \omega \tau^{-1})} = -\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i \omega \tau^{-1}} \quad (4.5)$$

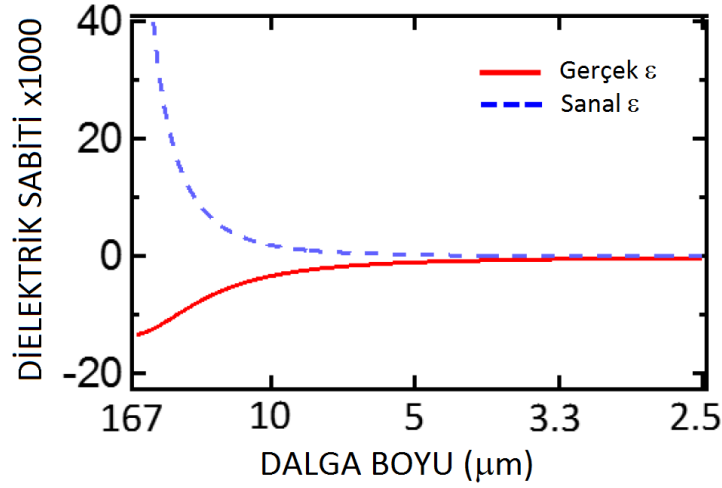
$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n}{m \varepsilon_0}} \quad (4.6)$$

Burada ω_p plazmon frekansını, e elektron yükünü, n elektron yoğunluğunu, m ise elektron kütesini ifade eder. Plazmon frekansı, metal içerisinde iletim bandında bulunan serbest elektronların ortak hareketinin frekansıdır. Metale bu frekansta bir elektrik alan uygulanırsa serbest elektronlar bu enerji ile osilasyona gireceklerdir. Elektronlar gelen ışınları emecek, gelen ışın elektronları ivmelendirecek ve yansıma olmadığı için emilen enerji ısıya çevrilecektir. Plazmon frekansından düşük frekanslarda metaller çok yüksek yansıtıcılığa sahiptirler. Plazmon frekansının üzerinde ise metaller yüksek oranda geçirgendir.

Duygunluk ile dielektrik sabiti arasında $\varepsilon(\omega) = 1 + \chi(\omega)$ şeklinde bir ilişki vardır. Böylelikle frekansa göre değişken dielektrik sabiti Eşitlik 4.7 ile gösterilmiştir:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i \Gamma \omega} \quad (4.7)$$

Burada $\Gamma = 1/\tau$ sönümlenme katsayısını göstermektedir. Şekil 4.2 ile kütleli altının gerçek ve sanal dielektrik katsayıları Eşitlik 4.7 ile hesaplanmıştır [55].



Şekil 4.2: Kütlesel altının frekansa göre dielektrik sabiti [55]

Drude eşitliği ile metallerin dielektrik sabiti hesaplanırken ultraviyole bandı ve üzeri için doğru sonuç verse de, daha düşük frekanslar için ve dielektrik malzemeler için hesaplaması yetersizdir. Drude eşitliği geçiş kuşağı bölgesindeki dielektrik değişimlerini hesaplayamamaktadır. Çünkü Drude, metalleri artı yüklü iyonlar ve bu iyonlara bağlı olmayan serbest elektron bulutu olarak modellenmiştir. Ancak dielektriklerde çok kuvvetli olan bu yay kuvveti metallerde de az miktarda bulunabilmektedir. Bu bağ ve farklı elektron enerjisi seviyeleri bazı rezonans frekanslarında (geçiş kuşağı) dielektrik sabitinin hızlı bir şekilde değişmesine sebebiyet vermektedir. Metaller için bu frekanslar genellikle görünür spektrumda olmaktadır. Drude eşitliğinin geliştirilmiş versiyonu olan Drude-Lorentz eşitliği yay kuvvetini ve geçiş bölgesi osilasyonlarını da hesaplayıp daha doğru sonuçlar verebilmekte ve Eşitlik 4.8 şeklinde ifade edilmektedir:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\Gamma\omega} + \sum_i \frac{f_i \omega_i^2}{\omega_i^2 - \omega^2 - i\Gamma_L \omega} \quad (4.8)$$

Drude-Lorentz eşitliğinde ikinci terime ω_0 eklemesi yapılmıştır. Bu frekans bileşeni dielektrik malzemelerde bulunan atom ve elektron arasındaki yay kuvvetinin osilasyon frekansını vermektedir. Metallerde atomlar ve elektronlar arası bağ çok az olduğundan bu değer ihmal edilebilmektedir. Üçüncü terim ise geçiş kuşağı etkisini ifade etmektedir. ω_i geçiş kuşağı osilasyon frekanslarını ve f_i ise bu osilatörlerin kuvvetini göstermektedir. Örneğin altın için plazmon frekansı 116 nm iken, yapılan çalışmalar [59] altının 468 nm ve 331 nm de ek

rezonans frekansları olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Kütleli altının parlak sarı olmasının sebebi bu dalga boylarının emilmesinden dolayıdır.

Kütleli metaller için Drude eşitliği yüksek bir doğrulukla dielektrik sabitini hesaplayabilse de kütleli madde yerine parçacıkların hesaplanmasında tam doğru sonuç vermemektedir. Parçacık boyutu, elektronların serbest ortalama yolundan küçük olduğu zaman elektronlar hareketleri süresince yüzey kenarlarına daha çok çarpma ve saçılma gerçekleştirirler. Bundan dolayı sönümlenme katsayısı Γ büyüme eğilimi gösterir. Nano parçacıklar için düzenlenmiş sönümlenme Eşitlik 4.9 ile gösterilebilir:

$$\Gamma = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{küt}} + \frac{2\nu_f}{d} \quad (4.9)$$

Eşitlikte d parçacığın çapını, ν_f elektronun Fermi hızını göstermektedir. Bu değer altın için $\nu_f = 1.4 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ hızındadır. Sonuç olarak geliştirilmiş Drude-Lorentz eşitliği ile parçacık boyu bilinen zifir-altın kaplamanın gerçek ve sanal dielektrik sabiti frekansa göre belirlenebilmektedir.

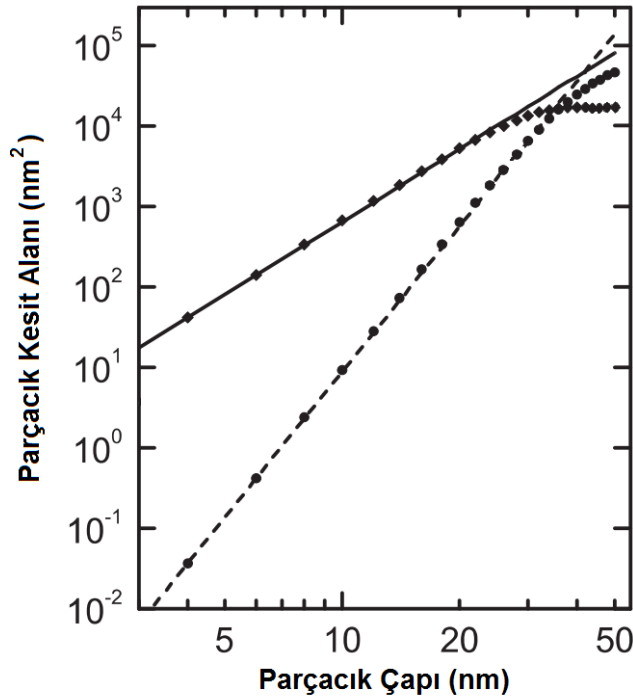
4.2.2 Landau-Lifshitz-Looyenga Teorisi

Parçacığın yüzey kesiti kendisine çarpan ışının dalga boyundan 100-1000 kat küçük ise bu çarpışma sadeleştirilmiş Mie teoremi [60] ile açıklanabilmektedir. Bu çarpışmanın sonucu kütleli madde ile çarpışan ışığın sonucundan çok farklıdır. Bu farklılık optik filtreler, yeni nesil boyalar gibi birçok alanda yeni uygulama alanları ortaya çıkarmıştır. Mie teoremi çarpışma sırasında ışığın enerjisinin ne kadarının emileceğini ve ne kadarının hangi vektörlerde saçılacağını açıklayabilmektedir. Eşitlik 4.10 ile Mie emicilik verimliliği ve Eşitlik 4.11 ile Mie saçılma verimliliği bulunabilir. Burada R parçacığın kesit alanını, λ gelen ışığın dalga boyunu ve m ise parçacığın kompleks dielektrik katsayısının, ortamın kompleks dielektrik katsayısına oranını vermektedir. Emicilik kesit alanının küpü ve saçılma kesit alanının altıncı kuvveti ile değiştiğinden dalga boyundan çok çok daha küçük parçalar için emicilik verimliliği artmakta, buna karşın parçacık boyu dalga boyuna yaklaştıkça da saçılma verimliliği artmaktadır. Ancak parçalar büyüdükçe emilme verimliliği azalsa da toplam kesit alanı arttığı için emilim bir noktaya kadar artacaktır. Parçacık belirli bir boyutu geçtikten sonra emilim verimliliği çok fazla düşerek toplam emilim değerinin azalmasına sebebiyet verecektir.

Şekil 4.3 ile görülebileceği gibi en yüksek emiciliğin ve parçacık boyutunun optimum bir aralığı vardır ve bu değer bir optimizasyon problemidir. Bu şekilde 533 nm dalga boyu ile etkileşime sokulan altın nano parçacıklarının emilme ve saçılma kesit alanları gösterilmiştir. Kare ile gösterilen değerler emicilik kesit alanını verirken, yuvarlak ile gösterilen değerler saçılma kesit alanını vermektedir.

$$\sigma_{emilim} = -\frac{8\pi^2}{\lambda} R^3 \text{Im} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \quad (4.10)$$

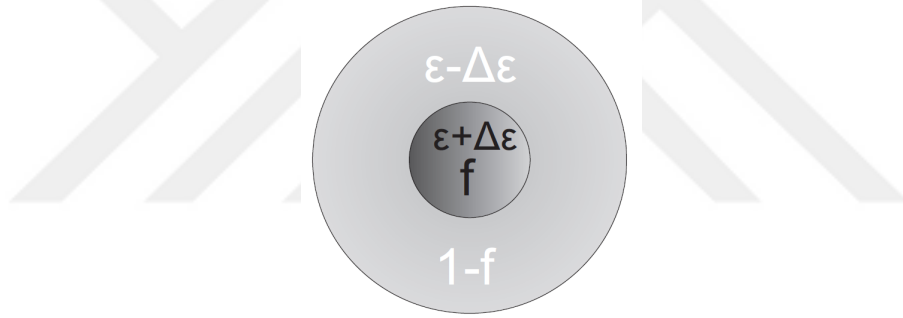
$$\sigma_{saçılım} = \frac{128\pi^5}{3\lambda^4} R^6 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \quad (4.11)$$



Şekil 4.3: Farklı boyutlardaki altın parçacıklarının emilme ve saçılma kesit alanları [60]

Bir dielektrik içerisinde farklı dielektrik sabitine sahip farklı boyutlarda bulunan parçacıkların ışın emilimi ve yansıması bulunmak istenirse, milyarlarca parçacık için Mie teoremi hesaplanmak zorundadır. Bu hesap yöntemi yüksek doğruluğa sahip olsa da işlem yükü olarak uygulanabilir olmadığından parçacığın ve içinde bulunduğu ortamın ortalama dielektrik sabitinin bulunması gerekmektedir. Bu hesabı daha pratik bir şekilde yapmak için çeşitli

efektif ortam teorileri geliştirilmiştir. Landau-Lifshitz-Looyenga [61] teorisi bu yöntemlerden birisi olup parçacıkların şeklinden bağımsız olarak görünür ve kızılötesi kuşakta çok pratik bir şekilde doğru sonuç vermektedir. Şekil 4.4 ile gösterildiği gibi bu teoride şekli bilinmeyen $\varepsilon + \Delta\varepsilon$ dielektrik sabitli küre $\varepsilon - \Delta\varepsilon$ dielektrik sabitli sanal bir küre içine alınır. Doluluk oranı bilinen bu sistemde küçük küre adım adım büyütülerek her adımda toplam dielektrik sabiti bulunmaktadır. Toplama işleminin sonucu, Taylor açılımı ile bulunabilir ve Eşitlik 4.12 ile gösterilebilir [61]. Burada ε_R ortamın efektif dielektrik sabitini, ε_P parçacığın dielektrik sabitini, ε_H baskın ortamın dielektrik sabiti ve f ise parçacık ve baskın dielektrik ortamın hacimsel oranını diğer bir ifadeyle doluluk oranını göstermektedir. Bu eşitlik ile doluluk oranı ve dielektrik sabitleri bilinen şekilsiz parçacıklarda o doluluk oranı için ortalama dielektrik değeri bulunabilmektedir. Bu teorinin eksik yanı plazmon, harmonik osilatör ve geçiş kuşağı rezonans bileşenlerini hesaba almamasıdır. Ancak zifir-altın için rezonans frekanslar 116 nm ile 468 nm aralığında olduğundan kızılötesi kuşakta rezonansın etkisi bulunmamaktadır. Bu yüzden hesaplamalarda az hata çıkacağı düşünülmüştür.



Şekil 4.4: Landau-Lifshitz-Looyenga ortalama dielektrik hesaplama [61]

$$\sqrt[3]{\varepsilon_R} = f \sqrt[3]{\varepsilon_P} + (1 - f) \sqrt[3]{\varepsilon_H} \quad (4.12)$$

4.2.3 Fresnel Denklemleri

Fresnel denklemleri elektromanyetik dalganın farklı ortamlardan geçerken nasıl davranacağını açıklar. Dalganın farklı ortamların sınırında hangi açı ve şiddetle yansıtacağını göstermektedir. Bu hesaplamaları yapabilmek için ortamların kompleks dielektrik sabitlerini

kullanır. Dalga boyunun bir fonksiyonu olan kırınım indisi kompleks dielektrik sabitinin kare köküdür [62].

$$n + ik = \sqrt{\varepsilon} \quad (4.13)$$

$$\Rightarrow \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 = (n + ik)^2 \quad (4.14)$$

$$\Rightarrow \varepsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (4.15)$$

$$\Rightarrow \varepsilon_2 = 2nk \quad (4.16)$$

Burada ε_1 ve ε_2 sırasıyla gerçekte ve sanal dielektrik sabitini göstermektedir. Dielektrik sabitinin gerçekte değeri (n) faz gecikmesini yani ortamın kapasitif mi yoksa indüktif mi olduğunu, sanal değeri (k) ise ortamın içinden geçen elektromanyetik dalganın emilerek enerjisini kaybetmesini ifade etmektedir. n ve k değerlerini bulmak için Eşitlik 4.15 ve Eşitlik 4.16 ortak çözülür ise sonuçlar şu şekilde gösterilebilir:

$$n = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} + \varepsilon_1}{2}} \quad (4.17)$$

$$k = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} - \varepsilon_1}{2}} \quad (4.18)$$

k değeri genellikle pozitif değerlidir. k değeri maddenin içinden ışığın geçmesi anında ne kadarının emileceğini belirlemektedir. Dielektrik malzemeler genellikle yok sayılabilecek küçüklükteki k değerine sahiptir. Bu maddelerden ışın geçerken emilim olmayıp, n değerinden dolayı sadece faz değişimi olmaktadır. Buna karşıt olarak metaller görünür ve kızılötesi dalga boylarında çok çok büyük k değerine sahiptir. Bunun anlamı metale gelen ışığın çok çok büyük oranının metalin hemen yüzeyinde emilip elektron hareketine çevrilmesidir. İvmelenmiş elektron kendi yörüngesine geçerken emdiği enerji kadar radyasyon üretmektedir.

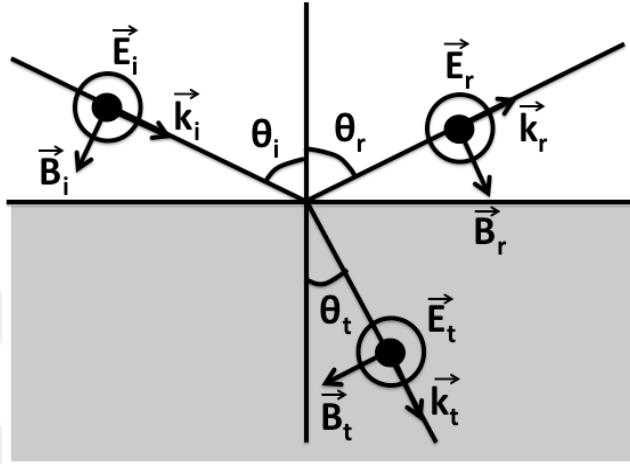
Sonuç olarak metalin hemen yüzeyinde emilen enerji, elektronları uyatarak aynı enerjinin geri salınmasına neden olmaktadır. Bu durumda plazmon frekansı etrafında bir bileşen olduğu zaman o bileşenin sadece emileceği, geri salınmayacağı unutulmamalıdır. Geri salınım metallere parlak bir görüntü vermektedir. Örneğin gümüş elementinin görünür dalga boyunda hiçbir rezonans frekansı olmaması, üzerine gelen bütün ışını tekrardan yansıtmasına, böylelikle parlak gümüş rengini almasına sebebiyet vermektedir. k değerinin negatif değerlikli olması ortamın ışın yükseltici gibi davrandığını göstermektedir. Böyle ortamlar lazerler gibi özellikle tasarlanmış yapılardır.

Metalin yüzeyine çarpan ışığın frekansı ile metal içerisindeki elektronlar toplu bir şekilde hareket eder. Işığın frekansı elektronların toplu osilasyon frekansından yani plazmon frekansından hızlı ise elektronlar ışığı ememeyip, metalin içerisinden geçmesini sağlayacaktır. Plazmon frekansından daha düşük bir frekanstaki ışın emilip geri yansıtacaktır. Bu yüzden ışığın yansıyan frekanslarındaki gerçek dielektrik kat sayısı n birden büyük olacaktır. Ancak bu metalik özellik zifir-altın için doğru değildir. Zifir-altın spektrumun büyük bir bölümünde 1 değerine yakın gerçek dielektrik kat sayısına sahiptir. Yani gelen ışığın çok az bir kısmı geri yansır. Zifir-altın içerisindeki metal yoğunluğu kütleli altının yüzlerce kat altında olduğundan dielektrik sabitinin sanal değeri k kütleli altına göre çok düşüktür. Böylelikle ışığın emilimi sadece yüzeyde değil, kaplama boyunca gerçekleşebilmektedir. Ancak yüksek bir emiciliğe sahip olmak için kaplamanın yeterli kalınlıkta olması gerekmektedir. Harris [64] bu tarzdaki yapılara *metalik vakum* ya da *seyreltilmiş metal* ismini vermiştir.

Kütleli metallerde gelen ışın yüzeyden emilip yansırken zifir-altın kaplamada durum farklıdır. Zifir-altın içerisinde ortalama partikül boyu elektronların serbest ortalama yolundan daha düşüktür. Gelen ışın aracılığı ile hızlanan elektron kütleli altına göre çok daha fazla yüzey sınırı ile karşılaşarak bu sınırlarda enerjisini *phonon* titreşimlerine çevirirler [63]. Mie teoremleri [60] ile açıklanabilen bu titreşimler, kaplamanın kendisini ısıtarak gelen ışığın ısıya çevrilmesi döngüsünü tamamlamasını sağlarlar.

Ortamın dielektrik sabitleri bilindikten sonra Fresnel denklemleri kullanılarak yansıma ve geçirgenlik katsayıları bulunabilir. Fresnel denklemlerinin çıkarımı için düzlemsel bir sınıra çarpan hem dikey hem yatay bileşeni olan bir elektromanyetik dalganın bu bileşenleri sınır koşulu ile çözülebilir. Bu koşul yüzeye paralel elektrik alan şiddeti olan $\vec{E}$ ve manyetik alan şiddeti olan $\vec{B}/\mu$ bileşenlerinin sınır boyunca devamlılık göstereceğini belirtir. Bu yapıda

elektrik ve manyetik alan birbirine dik ve kendilerine dik $\vec{k}$ yönünde ilerlemektelerdir. Elektromanyetik dalga içerisinde elektrik ve manyetik alan arasında $|\vec{E}| = \nu |\vec{B}|$ ilişkisi vardır ve burada $\nu = c/n$ ışığın ortam içindeki hızıdır. Şekil 4.5 ile gösterildiği gibi elektrik alan yüzeye paralel, manyetik alan ise yüzeye dik gelmektedir. Sınır koşulları gereği Eşitlik 4.19 elde edilmektedir. Benzer şekilde manyetik alanın yüzeye paralel bileşeni ise Eşitlik 4.20 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.5: Fresnel sınır koşulları [55]

$$\vec{E}_i + \vec{E}_r = \vec{E}_t \quad (4.19)$$

$$-\frac{B_i}{\mu_i} \cos \theta_i + \frac{B_r}{\mu_r} \cos \theta_r = -\frac{B_t}{\mu_t} \cos \theta_t \quad (4.20)$$

B yerine E/ν yazılır ve yansımadan dolayı $\theta_i = \theta_r$ olur ise Eşitlik 4.21 elde edilebilir.

$$\frac{n_i}{\mu_i c} (E_i - E_r) \cos \theta_i = \frac{n_t}{\mu_t c} E_t \cos \theta_t \quad (4.21)$$

Eşitlik 4.21 içerisinde Eşitlik 4.19 yazılır ve tez kapsamındaki ortamlar dielektrik tabanlı olduğundan manyetik geçirgenlik katsayısı (μ) 1 alınır ise E_r/E_i ve E_t/E_i oranları bulunabilir.

$$r = \frac{E_r}{E_i} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (4.22)$$

$$t = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (4.23)$$

Eşitlik 4.24 ve 4.25 eşitliğinin karesi alınıp güç oranları bulunur ise Fresnel yansıtıcılık ve geçirgenlik katsayıları bulunabilir. Kolaylık açısından θ açısı sıfır yani gelen ışın yüzeye dik gelir ise aşağıdaki bağlantılar bulunabilir.

$$R = \left(\frac{E_r}{E_i} \right)^2 = \left(\frac{n_i - n_t}{n_i + n_t} \right)^2 \quad (4.24)$$

$$T = \left(\frac{E_t}{E_i} \right)^2 \frac{n_t}{n_i} = \frac{4n_i n_t}{(n_i + n_t)^2} \quad (4.25)$$

Dielektrik katsayısı kompleks bileşen içeren yani kayıplı materyallerin indisi $\tilde{n} = n + ik$ şeklinde olduğundan yansıma ve iletim oranını bulmak için Eşitlik 4.24 ve Eşitlik 4.25 içerisine kompleks indis yazılır. Gösterim kolaylığı açısından θ açısı sıfır alınır ise aşağıdaki eşitlik elde edilebilir.

$$r = \frac{(n_1) - (n_2 + ik_2)}{(n_1) + (n_2 + ik_2)} \quad (4.26)$$

ve yansıyan genliğin kendisi ve kompleks konjügesi çarpılarak enerji hesaplanır ise aşağıdaki çıkarım elde edilebilir.

$$R = rr^* = \frac{(n_1 - n_2)^2 + k_2^2}{(n_1 + n_2)^2 + k_2^2} \quad (4.27)$$

Kayıplı ortamlarda yansıyan ve iletilen gücün toplamı, ortamdaki emilimden dolayı toplam enerjiyi vermemektedir. Işığın madde içerisinden geçerken emilme katsayısı Lambert-Beer

kanunu [65] ile bulunabilir. Eşitlik 4.28 ile bu katsayının sanal dielektrik katsayısı k değerine, ışığın frekansı ω değerine ve ışık hızına bağlı olduğu görülmektedir.

$$\alpha = \frac{2k\omega}{c} \quad (4.28)$$

Işığın ortamdan geçerken emilmesinden dolayı enerjisini kaybetmesi ise Eşitlik 4.29 ile gösterilebilir. Bu eşitlikte $\vec{z}$ ışığın yönü olan birim vektörü, d ise ışığın materyal içerisinde aldığı yolu belirtmektedir.

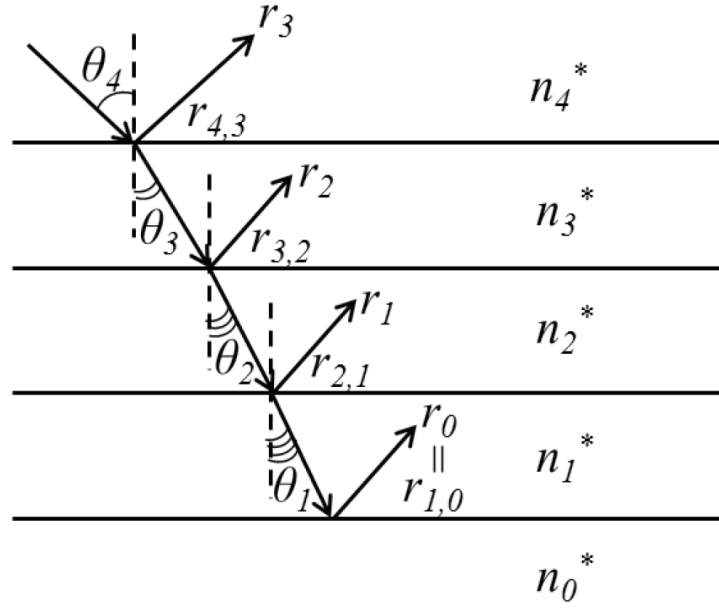
$$I = I_0 e^{-\alpha ed} = I_0 \exp\left(\frac{-2k\omega \vec{z}d}{c}\right) \quad (4.29)$$

4.2.4 Çok Katmanlı Fresnel Denklemleri

Çok katmanlı yapılarda ise çok fazla sayıda iç yansımalar oluşmaktadır. Bu yansımaları tek tek hesaplamak kolay olmadığı için çoğu zaman bilgisayar simülasyonları yapılmaktadır. Ancak birtakım varsayımlar ile kabul edilebilir seviyede doğru sonuçlar veren eşitlikler bazı kitaplarda bulunabilmektedir [66] [67]. Şekil 4.6 ile örnek gösterilen beş katmanlı yapıda eğer en alt tabaka tam yansıma yapar ise Eşitlik 4.30-4.33 ile en alt tabakadan başlayarak yüzeylerin yansıma katsayıları bulunabilir. Bu yapıda en alt tabaka tam yansıma yaptığı için emilen enerji, yansıma yapmayan enerjiye eşittir. Burada R yansıyan enerjiye, r yansıyan genliğe, $r_{i,j}$ yüzeyin o indis değeri için yansıma katsayısına, n^* kompleks indise, m ilgili katmana, θ ise ışının geliş açısına eşittir. Bu formülasyon ile en alt tabakadan başlayıp istenilen sayıda tabakanın toplam yansıma ve emicilik katsayıları bulunabilmektedir. Mikrobolometrelerde en alt katmanda tam yansıtıcı tabaka bulunduğu için bu yaklaşım çok katmanlı mikrobolometrelerin hesaplamalarında yüksek doğrulukta sonuç vermektedir.

$$r_{i,j} = \frac{n_i^* \cos \theta_i - n_j^* \cos \theta_j}{n_i^* \cos \theta_i + n_j^* \cos \theta_j} \quad (4.30)$$

$$r_0 = r_{1,0} \quad (4.31)$$



Şekil 4.6: Çok katmanlı yapılarda yansımalar

$$\Delta_m = \frac{4\pi k_m^* d \cos \theta_m}{\lambda} \Rightarrow \quad (4.32)$$

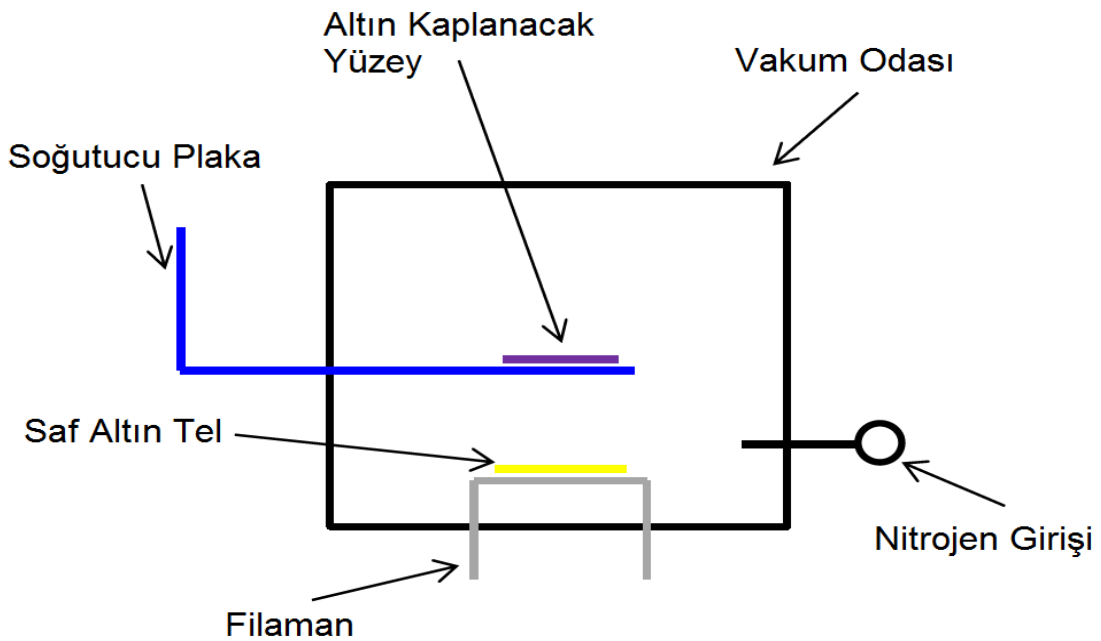
$$R = |r_m|^2 = \left| \frac{r_{m+1,m} + r_{m-1} e^{i\Delta_m}}{1 + r_{m-1} r_{m+1,m} e^{i\Delta_m}} \right|^2 \quad (4.33)$$

4.3 Zifir-Altın Üretim Yöntemi

Zifir-altın kaplama kızılötesi dedektörlerde kullanılmaya yakın zamanda başlamış olsa da üretim teknikleri çok eskiye dayanmaktadır. İlk üretim metodu Pfund [51] tarafından 1930 yılında ortaya konulmuştur. 1950'li yıllarda ise Harris [64] ve Cuff [68] tarafından detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Zifir-altın kaplama Şekil 4.7 ile gösterildiği gibi bir vakum odası ile başlar. Vakum odası için vakum ortamı yaratacak herhangi bir materyal kullanılabilir. Pfund [51] deneylerini cam ile, Downson [69] ise paslanmaz çelik kullanarak tamamlamıştır. Kuvvetli bir vakum ortamında buharlaşan altın atomlarının elektronları, onlarca santimetreye uzanabilen ortalama serbest yola sahiptir. Böylelikle kaplama sonrasında kaplanan yüzey üzerinde

pürüzsüz bir tabaka oluşturur. Ancak yüksek emilim için nanometrik parçacıklara sahip bir yüzey pürüzüne ihtiyaç vardır. Bunu sağlayabilmek için altın elektronlarının ortalama serbest yolunun azaltılması gerekmektedir. Ortama soygaz veya nitrojen pompalanması ile bu mesafe azaltılabilmektedir. Günümüz sistemlerinde genellikle nitrojen kullanılmaktadır [69]. Pompalanma işlemi, istenilen basınca ulaşınca kadar devam etmektedir. İstenilen basınca erişildiğinde filament ısıtılarak ortamda kalmış olabilecek oksijen filaman ile tepkiye sokulur. Böylelikle kaplama yapılacak altının oksitlenmesi önlenmiş olur. Ortamdaki oksijen miktarı yeterli seviyeye düştüğünde altın kaplama işlemi için gerekli ortam hazırlanmış olmaktadır [69]. Filamanın ısınıp ısıtılarak ortama dağıtılması için oda içerisinde nitrojen gazının sirküle ettirilmesi gerekmektedir. Filaman yapısı altının buharlaşma hızını etkilediği için üretim işleminde önem arz etmektedir. Harris [64] tarafından elektrik ile ısıtılan V şeklinde ortasında altın tel olan bir filaman kullanılmıştır. Filaman malzemesi olarak genellikle tungsten kullanılsa da alüminyum-oksit kaplı molibden elementi de kullanılmıştır [69].



Şekil 4.7: Altın kaplamada kullanılan vakum odası düzeneği

Filaman, zifir-altın kaplama işlemine başlamak için altının erime noktasına kadar ısıtılmaktadır. Altının erime hızı filamana verilen elektrik akımı ile kontrol edilebilmektedir. İstenilen buharlaşma hızına ulaşıldığında kaplama yapılacak malzeme soğutucu ile soğutulur.

Soğutucu olarak genellikle termoçift yapılar kullanılmaktadır. Soğutucu tabaka ile soğutulan malzeme üzerinde altın buharının yoğunlaşmasını sağlar. Yoğunlaşma işlemi devam ettirilerek istenilen kalınlıkla altın kaplama yapılabilir [69].

4.4 Zifir-Altın Üretim Parametreleri

Zifir-altın kızılötesi dalga boylarında çok iyi emicilik özelliği göstermektedir ve literatürde çeşitli araştırmalar bulunabilmektedir [68] [69] [70] [71]. Bu çalışmalar zifir-altın kaplamanın $0.4\ \mu\text{m}$ ile $1.1\ \mu\text{m}$ aralığındaki emiciliğin %99 mertebelerine kadar çıkabildiğini ortaya koymaktadır. Literatürde [70] [71] $0.2\ \mu\text{m}$ ile $100\ \mu\text{m}$ arasında yapılan emicilik testleri zifir-altın kaplamanın emicilik özelliğinin üç temel parametre ile belirlendiğini göstermektedir. Bunlar vakum odası basıncı, soğutucu sıcaklığı ve altının buharlaşma hızıdır [69].

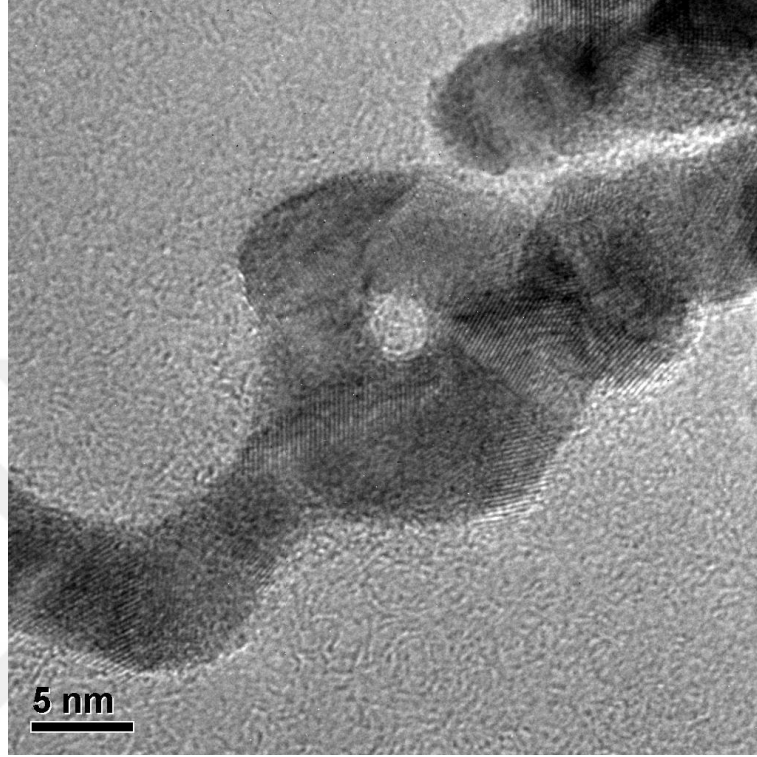
Vakum odasındaki soygaz basıncı zifir-altın kaplamanın yoğunluğunu belirtmektedir. Basınç azaldıkça buharlaşan altında bulunan elektronların ortalama serbest yolu uzayacağından kaplama daha pürüzsüz olacak, yüzey pürüzü azalacaktır. Azalan pürüz ise emiciliğin düşmesine sebebiyet verecektir. Basıncın yüksek olması ise kaplama yoğunluğunu arttırmakta ve altın partiküllerinin birbirine yaklaşarak temas etmesine sebep olmaktadır. Bu da partikül içerisinde hareket eden elektronun yüzeye çarpmadan daha uzun süre hareket edebilmesine olanak sağlamaktadır. Sonuç olarak elektromanyetik enerjinin ısıya dönüşmesi azalarak emilimin de azalması gözlenmektedir [70]. Yapılan deneyler sonucu ideal basıncın 0.7-11 Torr arasında olması gerektiği gözlemlenmiştir [72].

Soğutucu sıcaklığı ise kaplama yapılacak madde üzerindeki birikme hızını doğrudan etkilemektedir. Farklı birikme hızları farklı emicilik özellikleri oluşturmaktadır. Yapılan çalışmalar soğutucu plaka sıcaklığının -13 santigrat derece dolaylarında tutulabileceğini göstermiştir [72]. Buharlaşma hızı da soğutucu sıcaklığı gibi birikim hızını doğrudan etkileyerek kaplama kalitesini değiştirmektedir [64].

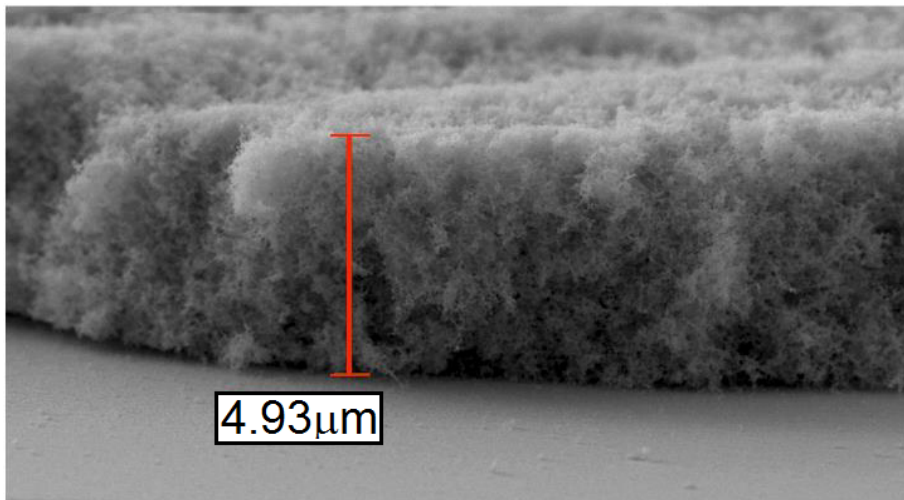
4.4.1 Basıncın Etkisi

Yapılan çalışmalarda [55] kaplama esnasında kullanılan soygaz basıncının ortaya çıkan kaplama yapısını doğrudan etkilediği görülmektedir. Altın elektronlarının ortalama serbest yo-

lunun yeterli kısalıkta olmasını sağlayan, nano partiküller yaratılabilmesine olanak tanıyan minimum basıncın 0.2 Torr olduğu deneylerde gösterilmiştir. Bu basınç altında oluşan nano zincirler altın kaplamasının pürüzlü bir yüzeyde oluşmasını sağlamıştır. Şekil 4.8 ile nano partiküller, Şekil 4.9 ile ise kaplama örneği gösterilmiştir.

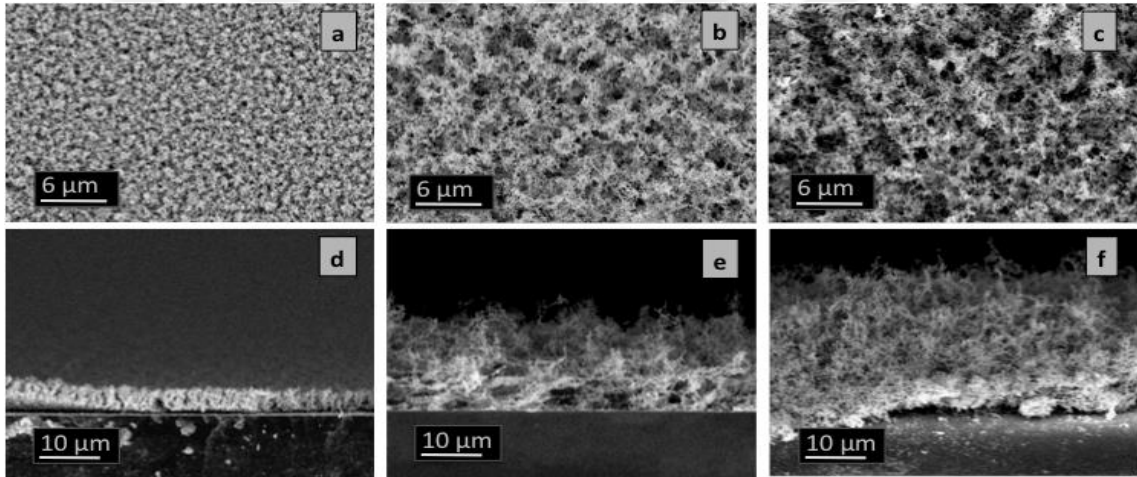


Şekil 4.8: Mie çarpışması yaratan nano partiküller [55]



Şekil 4.9: Nano partiküllerin oluşturduğu zifir-altın ile kaplı yüzey [55]

Aynı deneylerde 0.3, 1.5 ve 3 Torr gaz basıncı ile deneyler yapılmış ve kaplama kalınlıklarının basınca göre nasıl değişiklik gösterdiği bulunmuştur. Basıncın yükselmesi ile elektronların ortalama serbest yolu azalmış ve daha pürüzlü bir yapı oluşmuştur. Şekil 4.10 ile farklı basınçlar için farklı kaplama özellikleri gösterilmiştir. Kaplamalar ile ilgili ölçümler Şekil 4.11 ile ortaya konmuştur. Basıncın artması nano partikülleri arttırmaya yaramışsa da çok fazla artması partiküllerin birbirlerine bağlanıp nano partikül yerine nano zincir oluşturmalarına sebep olmuştur. Bu da elektronun hareketi süresince daha uzun bir yol alabilmesini sağlayarak yüzey saçılmasını azaltmıştır. Sonuç olarak emilme azalmış, uzayan serbest elektron yolundan dolayı elektronların birbirleri ile çarpışma sayısı artarak iletkenlik azalmıştır [73] [74]. Ayrıca yüksek basınç altın kaplamanın daha zayıf bağlar ile birbirine bağlanmasına neden olarak kaplamanın daha kısa sürede kaplandığı yerden ayrılmasına sebep olmuştur [75] [76].



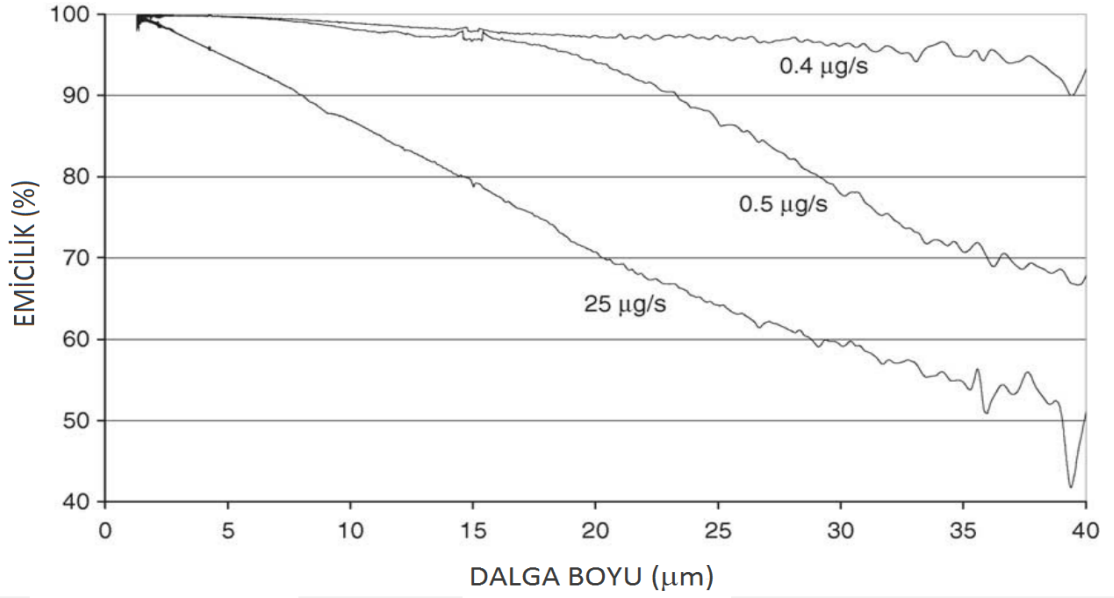
Şekil 4.10: a,b,c sırasıyla 0.3, 1.5 ve 3 Torr basıncı ile üretilen kaplamanın üstten görünüm-lerini; d,e,f ise aynı sıra ile bu kaplamaların yandan görünümü vermektedir [55]

Kaplama Tipi	N ₂ Basıncı (Torr)	Altın (mg)	Kaplama Hızı (mg/s)	İletkenlik (Ωm) ⁻¹
1	0.3	121	1.59	1090
2	1.5	121	0.97	53.8
3	3.0	121	1.47	4.04

Şekil 4.11: Farklı basınçlarda yapılan kaplamaların özellikleri [55]

4.4.2 Birikim Hızının Etkisi

Literatürde yapılar çalışmaları [69] birikim hızının da zifır-altın kaplamanın emicilik özelliklerini ciddi biçimde değiştirdiğini göstermiştir. Şekil 4.12 ile üç ayrı birikim hızında üretilen kaplamaların emicilik oranları gösterilmiştir. En düşük birikim hızına sahip kaplamanın geniş bir spektrumda en iyi emicilik özelliğine sahip olduğu bu deneyde ortaya çıkarılmıştır. Düşük birikim hızı aynı zamanda kaplama yoğunluğunu da azaltmaktadır. Azalan kaplama yoğunluğu termal kütleinin daha az olmasını sağlayarak kaplamayı kızılötesi dedektörler için daha ideal bir hale getirmiştir.



Şekil 4.12: Farklı birikim hızlarının emiciliğe etkisi [69]

5. MİKROBOLOMETRE MODELLEME VE PERFORMANS BULGULARI

Mikrobolometrenin tasarım parametrelerinin çıkarılabilmesi için birçok farklı parametrenin incelenmesi gerekmektedir. İncelenmek istenen parametrelerin etkisini görebilmek için ise yüksek doğrulukta bir model ve çok fazla parametre değişimini destekleyecek hızlı çalışan bir test ortamı tasarlanmalıdır. Bu yüzden tez kapsamında Matlab ve Simulink tabanlı bir modelleme ve test yapısı kurulmuştur. Bu test ortamı aracılığıyla modele girilen parametreler eşliğinde mikrobolometrenin zaman ekseninde çalıştırılması ve çıkan sonuçlardan performans parametrelerinin hesaplanması amaçlanmıştır. Böylelikle performans parametreleri sadece teorik eşitliklerle gösterilmeyip, bolometrenin gerçek çalışma mekanizması detaylı bir şekilde izlenebilmektedir. Hangi katmanın ne kadar ısı emdiği, ısıyı hangi hızla ilettiği, sisteme eklediği ısı kütlesi gibi birçok özellik rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Modele girilen katman özellikleri ile performans parametreleri ölçülebildiğinden bu değerler taranarak istenilen zaman sabiti (τ) ve algılayıcılık (D^*) için gerekli girdiler bulunabilmektedir. Bu girdiler her tabakanın kaplama kalınlığı ve fiziksel özellikleri, piksel boyutu, dalga boyu aralığı, görüntülenen objenin sıcaklığı, destek köprüsü boyutları, zifir-altın parçacık boyutları ve doluluk oranları, ortam sıcaklığı, kesici frekansı gibi neredeyse tüm parametreler olabilmektedir. Böylelikle tasarım isterleri doğrultusunda hedeflenen performans parametrelerini sağlayabilecek bir mikrobolometre tasarlamak mümkün olabilmektedir.

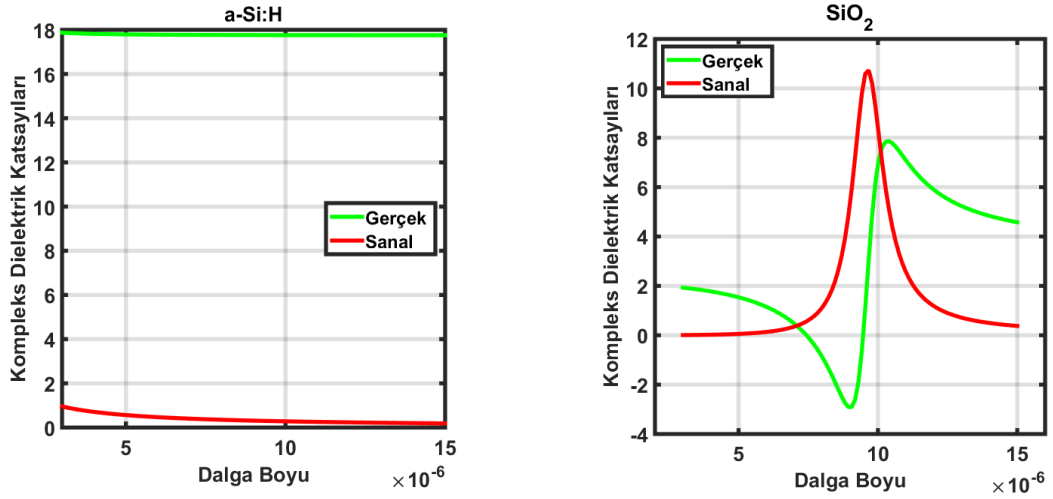
Tez kapsamında modelleme ve test ortamı 3 temel bileşene ayrılmıştır.

5.1 Çok Katmanlı Mikrobolometre Modelleme

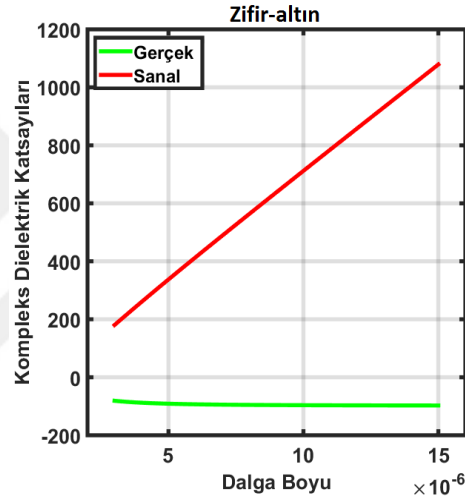
Çok katmanlı bir mikrobolometreyi modelleyebilmek için her katmanın ayrı ayrı yeterli doğrulukta modellenmesi gerekmektedir. Bunun için gerekli teorik hesapların doğru bir sıra ile ve çıktıların doğrulanarak yapılması gerekmektedir. Modelleme için gerekli teorik bilgiler detaylı bir şekilde Bölüm 4.2 içerisinde anlatılmıştır.

Modellemede temel amaç çok katmanlı yapının istenilen dalga boyu aralığındaki emiciliğini

bulmaktır. Bunu sağlayabilmek için her katmanın kompleks dielektrik sabitinin bulunmasından başlanabilir. Dielektrik sabitini bulmak için incelenecek malzemenin yapısı kullanılacak eşitliği belirlemektedir. Dielektrik malzemeler için Lorentz (Eşitlik 4.8), metalik malzemeler için Drude (Eşitlik 4.7) ve metalik ancak parçacık boyu ortalama elektron yolundan küçük metaller için ise Drude ile beraber sönümlenme katsayısı değiştirilmiş eşitlikler (Eşitlik 4.9) kullanılmaktadır. Tez kapsamında tasarlanan mikrobolometre yapısında tüm bu eşitliklerin kullanılmasını gerektiren katmanlar bulunmaktadır. En alttaki yansıtıcı tabaka için kütsel metal, a-Si:H, SiO_2 ve Si_3N_4 için dielektrik, zifır-altın kaplama için ise parçacık metal formülasyonları kullanılabilir. Şekil 5.1 ile farklı yapılarıdaki materyallerin orta ve uzak kızılötesindeki kompleks dielektrik katsayıları gösterilmiştir. Buradan görülebileceği gibi altının optik frekanslarda negatif değerlikli dielektrik sabiti bulunmaktadır. Bunun nedeni altına gelen elektromanyetik dalganın frekansının, plazmon frekansından düşük olmasıdır. Negatif dielektriğin fiziksel olarak yorumlanması çok kapsamlı bir konu olmakla beraber kısaca, gelen dalgaya karşı altın içerisinde bulunan elektronların, karşıt bir elektrik alanı oluşturması ile açıklanabilir. Bundan dolayı altın içerisindeki elektrik alan, uyarım elektrik alanı ile ters yönlü olduğundan negatif dielektrik sabiti oluşmaktadır. Katmanları oluşturan materyallerin kompleks dielektrik katsayıları bulunduktan sonra Eşitlik 4.17 ve Eşitlik 4.18 ile gerçek ve sanal indisler bulunabilir. Aynı materyallerin indisleri Şekil 5.2 ile gösterilmiştir. Buradan görülebileceği gibi SiO_2 9 μm dalgaboyu civarlarında plazmon rezonansına sahiptir. Bu dalga boyunda düşük n değerine sahip olduğu için yansıma yapmadan k değeri ile yüksek oranda emici, üstünde yüksek n değerinden dolayı yansıtıcı, altında ise düşük n ve düşük k değerinden dolayı geçirgen yapıda olması beklenmektedir. Bundan dolayı uzak kızılötesi bandı için emici tabaka olarak kullanılabilir. a-Si:H ise kızılötesi bandında büyük oranda yansıtıcı bir yapıya sahip olması beklendiğinden harici bir emici tabaka ile kullanılması gerekmektedir. Zifır-altın ise parçacık olarak hala metal gibi davranırsa da vakum içerisinde düşük oranda karıştırıldığında çok farklı davranmaktadır. 1 değerine yakın gerçek indis ve düşük sanal indis bu materyalin yansıtıcılığının oldukça az olacağını, düşük sanal indis ise kütsel metaller gibi emiciliğin hemen yüzeyde değil, materyalin tüm derinliklerinde olacağını göstermektedir. Kompleks indisler bulunduktan sonra her katmanın kalınlığına göre emicilik, yansıtıcılık ve geçirgenlik oranları kayıplı ortamların yansıtıcılığı olan Eşitlik 4.27 ve kayıplı ortamlardaki dalga ilerlemesi Eşitlik 4.29 ile bulunabilmektedir. Şekil 5.3 ile daha önceden dielektrik sabitleri ve indisleri bulunmuş a-Si:H, SiO_2 , ve zifır-altın katmanlarının 1 μm kalınlıktaki yansıtıcılık, emicilik ve geçirgenlikleri gösterilmiştir.



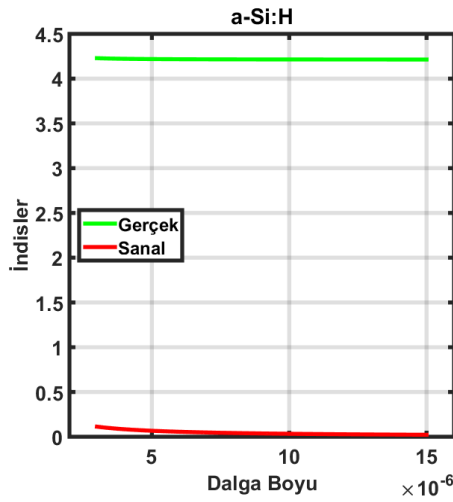
(a) a-Si:H katmanının orta ve uzak kızılötesi bandındaki dielektrik katsayısı (b) SiO₂ katmanının orta ve uzak kızılötesi bandındaki dielektrik katsayısı



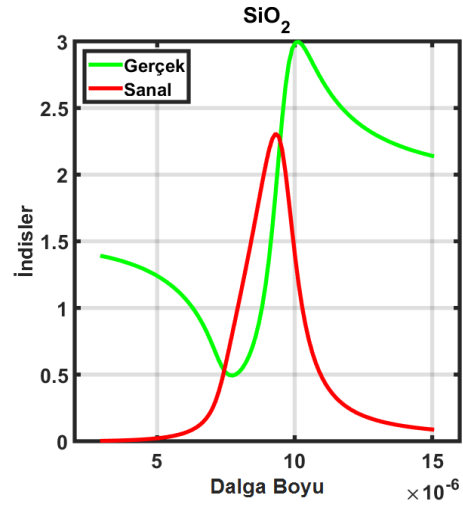
(c) 20 nm çapında altın parçacığının orta ve uzak kızılötesi bandındaki dielektrik katsayısı

Şekil 5.1: Farklı kaplamaların orta ve uzak kızılötesi bandındaki dielektrik katsayıları

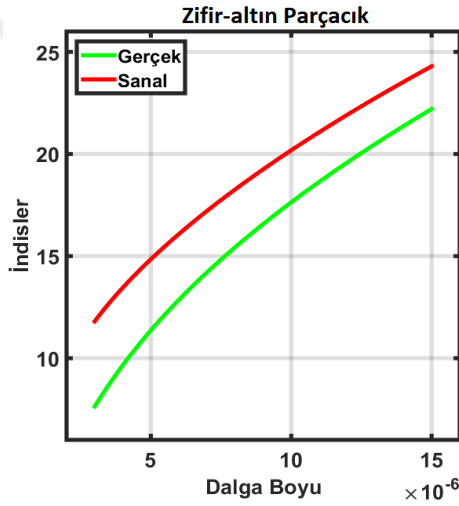
Burada SiO₂ ve a-Si:H katmanlarının yansıtıcılığının yüksek olduğu, bundan dolayı kalınlıkları arttırılsa bile emiciliğin yükselemeyeceği görülmektedir. Aksine zifir-altın kaplama düşük indisi sayesinde çok az bir yansımaya sahiptir. Böylelikle emicilik yeterli gelmez ise katman kalınlığı arttırılarak istenilen emicilik elde edilebilmektedir. Zifir-altın katmanının kızılötesi emici tabaka olarak kullanılabilmesini bu özellik sağlamaktadır. Şekil 5.3d ile 10 μm kalınlıklıkta zifir-altın katmanının özellikleri gösterilmiştir. Buradan da görülebileceği gibi kalınlık arttırılarak emicilik istenilen oranda arttırılabilmektedir. Tezin bu aşamasında tek bir katmanın yansıtıcılık, geçirgenlik ve emicilik değerleri hesaplanabilmektedir. Ancak



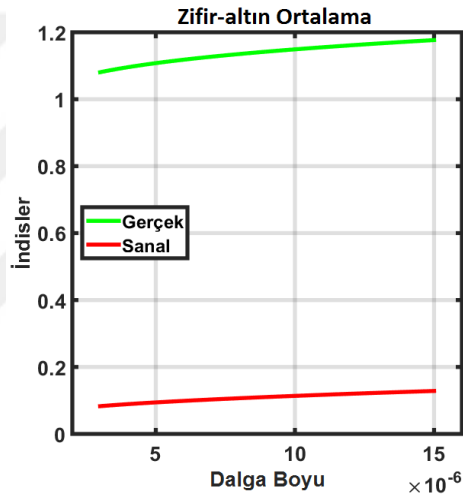
(a) a-Si:H katmanının orta ve uzak kızılötesi bandındaki indisi



(b) SiO₂ katmanının orta ve uzak kızılötesi bandındaki indisi



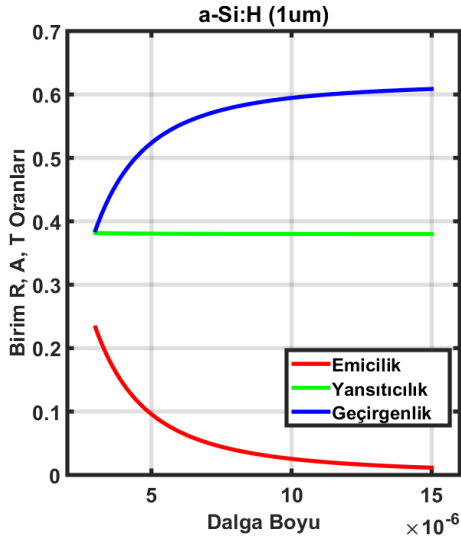
(c) 20 nm çapında altın parçacığının orta ve uzak kızılötesi bandındaki indisi



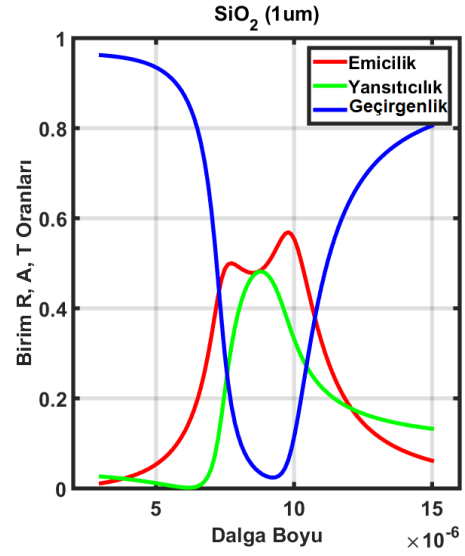
(d) 20 nm çapında ve %1.5 dolulukta zifir-altın katmanının orta ve uzak kızılötesi bandındaki indisi

Şekil 5.2: Farklı kaplamaların orta ve uzak kızılötesi bandındaki indisleri

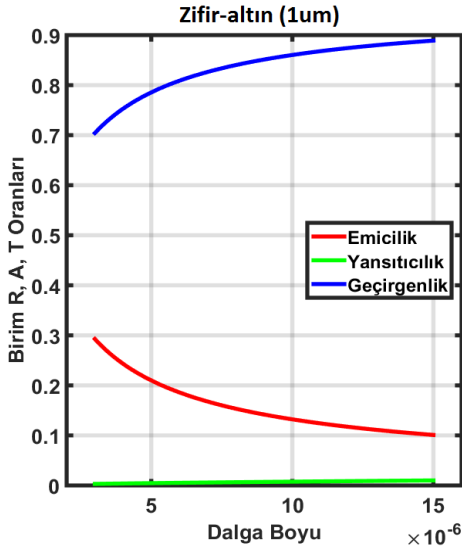
yapılan bu hesapları literatürdeki bilgiler ile doğrulamak gerekmektedir. Bu doğrulamayı yapabilmek için gerçekten üretilmiş zifir-altın katmanının parametrelerini kullanarak yakın sonuçların elde edilip edilemeyeceği düşünülmüştür. Kontrol grubu olarak D. Panjwani [55] tarafından üretilen katman kullanılmıştır. Tablo 5.1 ile üretilen 3 farklı yapının üretim parametreleri gösterilmiştir. Şekil 5.4 ile ise bu katmanların optik özellikleri ve tez kapsamında kullanılan modelin sonuçları gösterilmiştir. Burada Şekil 5.7a literatürde geçen ve gerçekten üretilen 3 çeşit zifir-altın kaplamasının özelliklerini, Şekil 5.7b ise modelden elde edilen sonuçları göstermektedir.



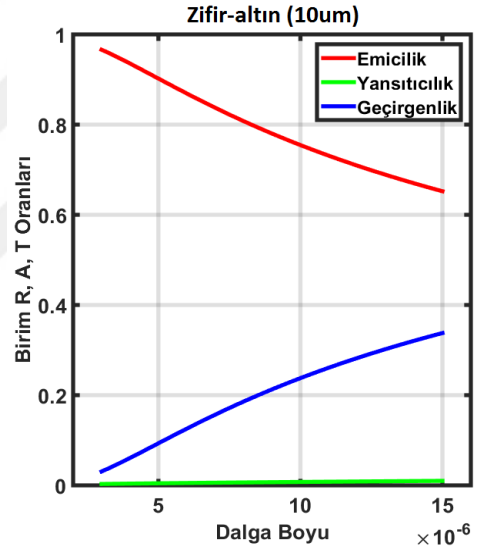
(a) 1 μm kalınlıktaki a-Si:H katmanının optik özellikleri



(b) 1 μm kalınlıktaki SiO₂ katmanının optik özellikleri



(c) 1 μm kalınlıktaki zifir-altın katmanının optik özellikleri



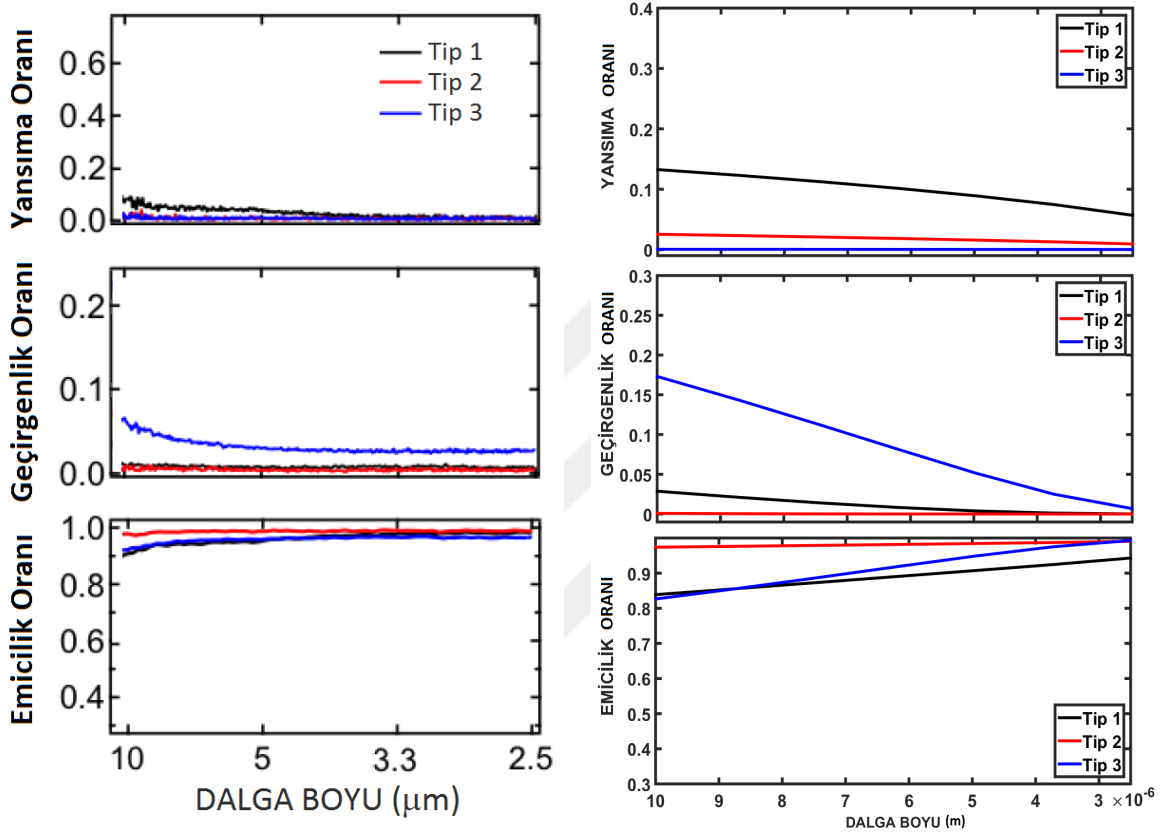
(d) 10 μm kalınlıktaki zifir-altın katmanının optik özellikleri

Şekil 5.3: Mikrobolometreyi oluşturan katmanların orta ve uzak kızılötesi bandındaki R, A, T değerleri

Üretim parametreleri verilen bu malzemelerin emicilik, yansıma ve geçirgenlik testleri karşılaştırmalı olarak yapılmış olup bu değerler 2-10 μm spektrum aralığında incelenmiştir. Yüzdelik değerlerin oranı alınırken, yansıma için kütle halindeki altın, geçirgenlik için ise vakum ortamı referans değer olarak alınmıştır. Görüldüğü gibi Tip 1 kaplama uzun dalga boylarında düşük emiciliğe ve yüksek yansımaya sahiptir. Bunun sebebi Tip 1 kaplamanın

Tablo 5.1: Farklı özelliklerde üretilmiş zifir-altın kaplamalar

Kaplama Tipi	N_2 Basıncı	Doluluk Oranı	Parçacık Boyutu	Kalınlık
1	0.3 Torr	% 2.5	5 nm	$3 \mu m$
2	1.5 Torr	% 1.2	20 nm	$20 \mu m$
3	3.0 Torr	% 0.4	30 nm	$40 \mu m$



(a) Üretimi yapılan zifir-altın kaplamanın R, A, T ölçümleri

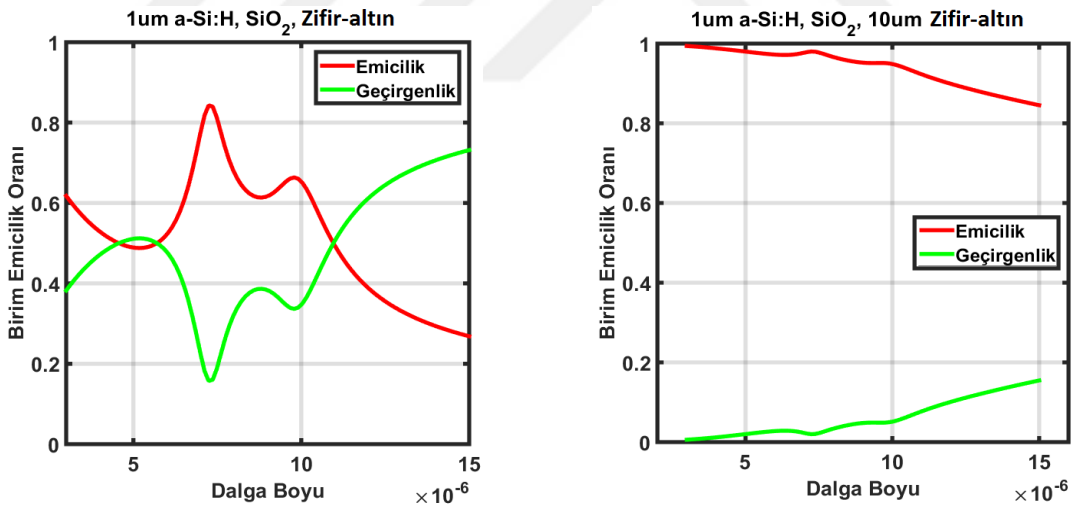
(b) Teorik model kullanılarak elde edilen zifir-altın kaplamanın R, A, T değerleri

Şekil 5.4: Tek katmanlı yapı için kullanılan modelin doğruluğunun karşılaştırılması

düşük basınçtan dolayı emilimi sağlayacak nano parçacıklardan yoksun, daha pürüzsüz bir yapıda olmasıdır (Bölüm 4.4.1). Sonuç olarak uzun frekanslarda emici tabakadan çok kütleli altın gibi davranmaktadır. Tip 3 kaplama ise nano parçacıkların fazlalığından en düşük yoğunluğa ve en büyük kalınlığa sahip kaplamadır. Bu düşük yoğunluk malzemenin geçirgenliğini artırıp, enerjinin emilemeden kaplama içerisinden geçmesine neden olmaktadır. Sonuçlardan görüldüğü üzere üretimi yapılmış gerçek sonuçlar ile tezde kullanılan model tamamen aynı olmasa da paralel sonuçlar vermektedir. Farklılıkların büyük sebebi modelde

birçok değer ortalama olarak alınmışken, gerçek malzemelerde üretim yönteminden kaynaklı öngörülemeyen değişiklikler olmaktadır.

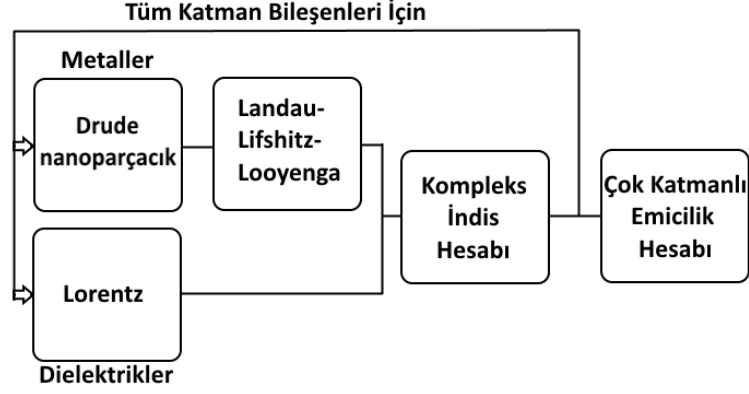
Tek katmanlı bir yapının optik özellikleri doğru bir şekilde modellendikten sonra çok katmanlı yapılara geçiş yapılabilir. Mikrobolometrelerde okuma devresini algılayıcı tabakadan ısıtılma anlamında izole etmek için yansıtıcı plakalar kullanılmaktadır. Bundan dolayı geçirgenlik olmadığı kabul edilebilir. Bu bilgiler eşliğinde çok katmanlı yapıların emicilik ve yansıma katsayılarını bulmak için daha önceden anlatılan eşitlikler 4.30-4.33 kullanılabilir. Bu formülasyonun sonucunda katmanların toplam emiciliği bulunabilmektedir. Toplam etki katmanların tek tek etkisinden bir hayli farklı çıkmaktadır. Bunun temel sebebi katmanlardan emilmeden geçen elektromanyetik enerjinin en alt tabakadan yansıyarak tekrardan emilebilmesidir. Bu sayede daha ince katmanlar ile daha yüksek emicilik oranları elde edilebilmektedir. Şekil 5.5 ile iki farklı çok katmanlı yapının emicilik oranları gösterilmiştir. Bu yapıda yukarıdan aşağıya 1'er μm zifir-altın, SiO_2 , a-Si:H, vakum ve yansıtıcı olarak 5 μm altın plaka kullanılmıştır. Diğer yapıda ise emiciliği arttırmak için zifir-altın katmanını 1 μm yerine 10 μm seçilmiştir. Resimlerden görülebileceği gibi çok katmanlı yapının emiciliği katmanların emiciliğinin tek tek toplamından daha fazladır. Hesaplama sırasını görselleştirmek



(a) 1 μm kalınlıktaki zifir-altın, SiO_2 , a-Si:H çok katmanlı yapının emiciliği (b) 10 μm zifir-altın, 1 μm kalınlıktaki SiO_2 ve a-Si:H yapısının emiciliği

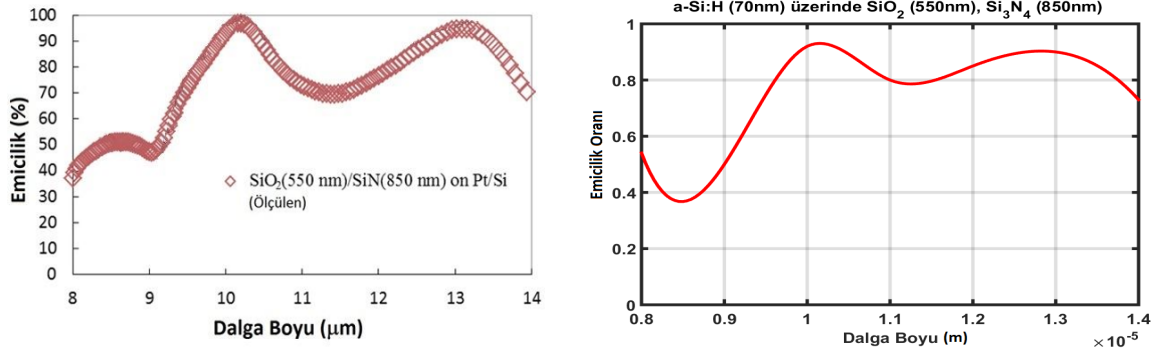
Şekil 5.5: Çok katmanlı yapıların emicilik karşılaştırması

için Şekil 5.6 incelenebilir. Tüm bu işlemler sadece seçilen bir dalga boyu için yapılmaktadır. Belirli bir bant genişliğindeki emiciliği bulmak amacıyla her dalga boyu için bu hesap yeniden yapılarak sonuçlar birleştirilmektedir.



Şekil 5.6: Çok katmanlı yapı emicilik hesabı işlem basamakları

Çok katmanlı yapı modelinin de tek katmanlı yapıdaki gibi çıktılarının doğrulanması planlanmıştır. Bunun için literatürde çok katmanlı yapı kullanan ve çok katmanlı yapının üretilip ölçümlerinin alındığı bir kaynak [4] kullanılmıştır. Burada emici tabaka olarak 550 nm SiO_2 ve 850 nm Si_3N_4 , algılayıcı tabaka olarak ise 70 nm kalınlığında ince metal film kullanılmıştır. Şekil 5.7 ile gerçek ve modelleme sonucu elde edilen emicilik oranları gösterilmiştir. Sonuçlar beklenildiği gibi birebir aynı olmasa da birçok noktada paralellik göstermektedir. Tez kapsamında ince metal film modellemesi ele alınmadığından, bu materyal yerine aynı kalınlıkta a-Si:H kullanılmıştır. Ancak emilimin çok küçük bir kısmı bu tabakada olacağından etkisinin az olacağı düşünülmüştür.



(a) Üretimi yapılan çok katmanlı kaplamanın emicilik ölçümleri (b) Teorik model kullanılarak elde edilen çok katmanlı kaplamanın emicilik değerleri

Şekil 5.7: Çok katmanlı yapı için kullanılan modelin doğruluğunun karşılaştırılması

Tezin bu noktasında ister metal ister dielektrik olsun farklı yapıdaki ve fiziksel boyutlardaki materyallerin tek katmanlı, ardından bu materyallerle oluşturulmuş çok katmanlı yapıların

emiciği, yansıtıcılığı ve geçirgenliği bulunabilmektedir. Bu bilgiler eşliğinde tasarlanmak istenen emici tabaka veya tez konusu dışında sayılabilecek optik filtrelerin tasarımı yapılabilmektedir. Bir sonraki bölümde modellenmesi yapılan mikrobolometre pikselinin test ortamına aktarılması ve performans parametrelerinin ölçülmesi işlenmiştir.

5.2 Mikrobolometre Karakterizasyonu

Mekanik tasarımı yapılan mikrobolometrenin algılayıcılık ve zaman sabiti gibi en önemli iki parametresinin doğru bir şekilde bulabilmesi için benzetim ortamında bu mikrobolometrenin çalıştırılması gerekmektedir. Bu nedenle hızlı çalışan, güvenilir, incelenmeye açık ve özellikleri kolaylıkla değiştirilebilen bir test ortamı tasarlanmıştır. Karakterizasyon işlemi 2 temel modül ile anlatılabilir.

5.2.1 Modeli Oluşturma ve Test Ortamı

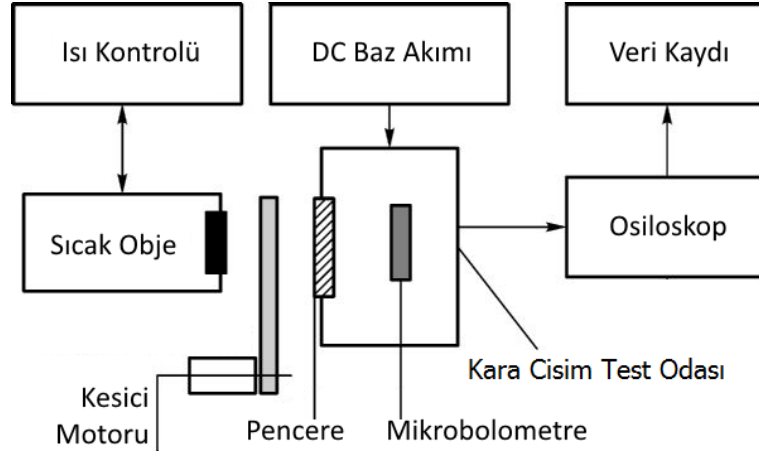
Mikrobolometre katmanlarının dielektrik sabitlerini hesaplayabilmek için kullanılan eşitlikler önceki bölümlerde anlatılmıştır. Ancak eşitliklerde kullanılan sabit değerler her materyal için farklıdır. Hesaplamalarda kullanılan sabit değerler Tablo 5.2 ile gösterilmiştir. Bu sabitleri kullanarak, istenilen kalınlık için çok katmanlı yapının emicilik özellikleri bulunabilmektedir. İstenilen katman kalınlıkları da sisteme girildikten sonra mikrobolometre yapısı karakterizasyona hazırlanmış olur.

Mikrobolometrenin algılayıcılık değerini ölçmek için gerçekte kullanılan test ortamı sanal ortamda da tekrarlanmalıdır. Şekil 5.8 ile bu test ortamı görülebilir.

Burada "ısı kontrolü" birimi mikrobolometreye gösterilecek olan kara cismin sıcaklığını kontrol eder. Orta veya uzak kızılötesi bantları için farklı sıcaklık değerleri seçilebilmektedir. "Sıcak obje" bir kara cisim olup 1 m^2 alana sahiptir ve mikrobolometreye paralel olarak konumlandırılmıştır. "Kesici" olarak adlandırılan birim sıcak objeden çıkan elektromanyetik dalgaların mikrobolometreye ulaşmasını engelleyen veya ulaşmasını sağlayan yarısı geçirgen, diğer yarısı ise geçirgen olmayan bir disk. Disk, sabit bir frekansta dönen bir motora bağlıdır. Bu sayede mikrobolometre yüzeyine uygulanan elektromanyetik enerji periyodik olarak kesilip tekrar verilmektedir. Böylelikle mikrobolometrenin istenilen frekanstaki ka-

Tablo 5.2: Mikrobolometre modellemesinde kullanılacak sabitler

Özellik	Değer	Birim
Kesici - Piksel		
Kesici Kapalı Sıcaklığı	293	K
Kesici Frekansı	30	Hz
Kare Piksel Boyutu	10-60	μm
Gürültü Bant Genişliği	1	Hz
a-Si:H		
Elektrik İletkenlik	5×10^{-1}	$1/(ohm.m)$
TCR	-0.028	K
Özkütle	2300	kg/m^3
Öz Isı Sabiti	700	$J/(kg.K)$
Isıl İletkenlik	1.5	$W/(m.K)$
Besleme Voltajı	4	V
$\omega_p \parallel \omega_0 \parallel \Gamma$	14.14 $\parallel$ 3.71 $\parallel$ 2.14	eV
ε_∞	3.22	ε_r
NiCr Köprü		
Alan	1×10^{-12}	m^2
Isıl İletkenlik	11	$W/(m.K)$
Uzunluk	Piksel Boyutu + 7×10^{-6}	m
Zifir-Altın		
Özkütle	19300	kg/m^3
Öz Isı Sabiti	129	$J/(kg.K)$
Isıl İletkenlik	200	$W/(m.K)$
$\omega_p \parallel \Gamma$	9.03 $\parallel$ 0.444	eV
V_f	1.4×10^6	m/s
SiO ₂		
Özkütle	2200	kg/m^3
Öz Isı Sabiti	700	$J/(kg.K)$
Isıl İletkenlik	1.4	$W/(m.K)$
$\omega_p \parallel \omega_0 \parallel \Gamma$	0.158 $\parallel$ 0.129 $\parallel$ 0.018	eV
ε_∞	2.09	ε_r
Si ₃ N ₄		
Özkütle	2810	kg/m^3
Öz Isı Sabiti	880	$J/(kg.K)$
Isıl İletkenlik	25	$W/(m.K)$
$\omega_p \parallel \omega_0 \parallel \Gamma$	0.173 $\parallel$ 0.1 $\parallel$ 0.018	eV
ε_∞	3.68	ε_r



Şekil 5.8: Mikrobolometre performansının ölçülmesini sağlayan test ortamı

rakteristiği ölçülebilmektedir. Tez kapsamında saniyede 30 kere değişen bir görüntünün yakalanması hedeflendiğinden kesici frekansı 15 Hz olarak seçilmiştir. 15 Hz sayesinde mikrobolometre yüzeyine saniyede 15 kere sıcak obje gösterilip, 15 kere oda sıcaklığı gösterilmiştir. "DC baz akımı" ise mikrobolometrenin a-Si:H algılayıcı katmanına uygulanmaktadır. Bu akım sayesinde algılayıcı katman üzerinde oluşan ve sıcaklık ile değişen bu voltaj grafiği "osiloskop" ile izlenerek kaydedilebilmektedir. Bu değerler daha sonra işlenerek algılayıcılık bulunabilmektedir. Farklı fiziksel boyutlardaki a-Si:H katmanının direnci değiştiğinden farklı baz akımlar seçilmelidir. Test boyunca oda sıcaklığında a-Si:H üzerinde 4 V olacak şekilde bir baz akım hesaplanmaktadır. "Kara cisim test odası" ise vakum ortamı olup, mikrobolometrelerde konveksiyon yolu ile ısı iletimini ve piksellerin birbirine olan etkilerini yok etmek için kullanılmaktadır.

Mikrobolometre yüzeyinin ısınmasını, mikrobolometreye doğrultulmuş bir kara cisimden çıkan elektromanyetik güç sağlamaktadır. Literatürdeki modellerde genellikle bu güç sabit bir değer olarak alınmaktadır. Tez kapsamında bu yöntemden daha doğru sonuçlar veren kapsamlı bir yöntem kurgulanmıştır. Daha önceden anlatıldığı gibi (Bölüm 2.1) Planck kanunu birim alana sahip sıcak bir cismin bir yüzünden, cismin yüzeyine dik bir biçimde çıkan elektromanyetik dalgaların gücünü, dalga boyunun bir fonksiyonu olarak vermektedir. Bu bilgi ile yola çıkılarak test ortamında gösterildiği gibi 1 m^2 yüzey alanına sahip sıcak objenin mikrobolometreye aktardığı güç şu şekilde ifade edilebilir:

$$Aktarılan\ Güç = A_{piksel} \int_{\lambda=\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (M(\lambda, T_{obj}) - M(\lambda, T_{piksel})) \tau_o(\lambda) A(\lambda) d\lambda \quad (5.1)$$

Burada A_{piksel} mikrobolometre yüzey alanını göstermektedir. Kara cisimden dik bir biçimde çıkan elektromanyetik dalgalardan sadece piksel alanı kadar olan kısım mikrobolometreyi ısıtacaktır. Bu yüzden bu çarpan kullanılmaktadır. Planck kanunu, cisimden çıkan elektromanyetik enerjinin tamamının çevresi tarafından emildiğini ifade etmektedir. Bu düşünce ile yola çıkıldığında kara cisimden mikrobolometre yüzeyine güç aktarılırken aynı zamanda mikrobolometre yüzeyinden de kara cisme bir güç aktarılmaktadır. Mikrobolometreye aktarılan net gücü bulmak için bu iki gücün farkı alınmalıdır. Ayrıca mikrobolometreye aktarılan güç birçok işlem sonunda bulunan mikrobolometrenin emiciliği $A(\lambda)$ ve kanal geçirgenliği τ_o ile çarpılarak bulunmaktadır. Hesap kolaylığı olması açısından kanal geçirgenliği tüm dalga boyları için 1 olarak alınmıştır. Şu ana kadar anlatılanlar tek bir dalga boyu için geçerlidir. İstenilen spektrum aralığı için bu hesaplar her dalga boyu için tekrarlanarak toplamaları alınmalıdır. Şekil 5.9 ile bu durum daha rahat anlaşılabilir. Her bir dalga boyu için Planck



Şekil 5.9: 300K sıcaklık farkından kaynaklanan güç dağılımı ve aynı bant içindeki emicilik

kanunu ile hesaplanmış güç ve çok katmanlı yapının emicilik oranı çarpılır. Tüm bu değerler toplanarak ilgili spektrum için mikrobolometreye aktarılan toplam güç bulunabilir. Bu noktaya gelindiğinde mikrobolometrenin emiciliği hesaplanmış, mikrobolometreyi ısıtan gücün teorisi oluşturulmuştur. Ayrıca mikrobolometrenin performans parametrelerinin bulunacağı test ortamı anlatılmıştır.

Şimdiye kadar anlatılan tüm bilgiler eşliğinde mikrobolometreyi karakterize etmek için Matlab ve Simulink programları kullanılmıştır. Kısaca, program çalıştırıldığında önce sabit değerler kullanılarak emicilik hesaplanır. Ardından gerekli bilgiler Simulink ortamına aktarılarak Şekil 5.8 ile anlatılan test ortamı canlandırılır. Daha sonra ise a-Si:H katmanının sıcaklık bilgisi yeniden Matlab ortamına aktarılarak algılayıcılık ve zaman sabiti hesaplanır. İşlem basamakları Şekil 5.10 ile gösterilmiştir. İşlem basamaklarında dielektrik, indis ve emici-

[illegible]

63

rılan güç önce en üst tabaka olan zifir-altın katmanını ısıtacak, ardından bir alt katman olan SiO₂ katmanını zifir-altın katmanının ısıl direnci ile ısıtacak ve bu işlem a-Si:H hattının ısınmasına kadar devam edecektir. Görülebileceği gibi a-Si:H katmanına ayrıca ROIC ile arasındaki bağlantıyı sağlayan köprüler de eklenmiştir. Bu bloklardaki en önemli mekanizmalardan birisi de "geri besleme" hattıdır. Daha önceden anlatıldığı gibi mikrobolometreye aktarılan güç, sıcak obje ve mikrobolometre yüzey sıcaklığı farkından oluşmaktadır. Ancak benzetim programının çalıştığı süre boyunca mikrobolometre yüzeyi ısınıp soğumaktadır. Bu sebeple obje ve mikrobolometre arasındaki sıcaklık farkı da değişmektedir. Bu değişimi hesaplayabilmek ve aktarılan gücü doğru bir biçimde elde edebilmek için benzetimin her basamağında, mikrobolometre yüzey sıcaklığından kaynaklanan Planck gücü yeniden hesaplanarak objenin yaydığı güçten çıkarılmıştır. Simulink benzetimi tamamlandığında a-Si:H sıcaklık grafiği Matlab ortamına aktarılmaktadır.

a-Si:H katmanının sıcaklığı elde edildiğinde $\Delta V = I_{baz} \Delta R = I_{baz} a R_{a-Si:H} \Delta T$ ilişkisi ile voltaj değişimi kolaylıkla hesaplanabilir. Burada a TCR değerini, I_{baz} algılayıcı katman üzerindeki baz akımını, $R_{a-Si:H}$ ise a-Si:H katmanının direncini göstermektedir. Bu direnç değeri ise algılayıcı katmanın fiziksel ve elektriksel özellikleri ile belirlenmektedir. Eşitlik 5.2 ile bu hesaplama gösterilebilir.

$$R_{a-Si:H} = \frac{1}{\sigma_{a-si:H}} \times \frac{X \text{ Kenarı}}{Y \text{ Kenarı} \times \text{Katman Kalınlığı}} = \frac{1}{\sigma_{a-si:H}} \times \frac{1}{\text{Katman Kalınlığı}} \quad (5.2)$$

Burada $\sigma_{a-si:H}$ elektriksel iletkenlik katsayısını göstermektedir. Akımın ilerlediği alan a-Si:H katmanının Y (kare algılayıcının bir kenarı) ve Z (algılayıcı katman kalınlığı) eksenini, iletkenin uzunluğu ise pikselin X (kare algılayıcının bir kenarı) eksenini olarak düşünülmüştür. Tez kapsamında piksel kare şekilde tasarlandığından X ve Y kenarı eşittir. Algılayıcı tabaka direnci bulunduktan sonra algılayıcı tabaka baz akımı I_{baz} , $V = IR \Rightarrow I_{baz} = V/R_{a-Si:H}$ ilişkisi ile bulunabilmektedir. Burada algılayıcı tabaka üzerindeki voltaj 4V etrafında tutulmuştur. 4V değerinin seçilme sebebi ise 5V beslemeye sahip ROIC ile bu direncin okunabilmesini sağlamaktır.

Bir sonraki basamak ise voltaj tepkiselliği, yani sisteme gelen güç değişimi ile sistem çıkışı olan voltaj değişiminin oranı $R_v = \Delta V / \Delta \text{Gelen Güç}$ değerinin bulunmasıdır. ΔV

değeri bir önceki basamakta bulunmuştur. Mikrobolometreye gelen güç değişimi sıcak objenin gönderdiği güç ile kesici kapalı iken oda sıcaklığının mikrobolometreye gönderdiği gücün farkıdır. Eşitlik 5.3 ile bu değer daha iyi anlaşılabilir.

$$\Delta G_{\text{Gelen Güç}} = A_{\text{piksel}} \int_{\lambda=\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} (M(\lambda, T_{\text{obj}}) - M(\lambda, T_{\text{ortam}})) \tau_o(\lambda) d\lambda \quad (5.3)$$

Gelen güç de bulunduktan sonra voltaj tepkiselliği hesaplanmıştır. Bir sonraki basamakta ise destek köprülerinin ısıl direnci G_{th} , mikrobolometrenin toplam ısıl kütlesi ve mikrobolometrenin zaman sabiti τ bulunmaktadır. Mikrobolometrelerde algılayıcı tabakanın ısısının destek köprüleri aracılığı ile iletildiği daha önceki bölümlerde anlatılmıştır. Bundan dolayı köprülerin ısıl iletkenliği şu şekilde bulunabilmektedir:

$$G_{\text{köprü}} = \sigma_{\text{köprü}} * \frac{\text{Köprü Alanı}}{\text{Köprülerin Uzunluğu}} \quad (5.4)$$

Bu eşitlikte $\sigma_{\text{köprü}}$ ısıl iletkenlik sabiti olup, ısısının köprü bacalarının kesit alanı üzerinden ilerlediği ve iletim yolunun köprü bacalarının uzunluğu olduğu düşünülmüştür. Toplam ısıl kütleyi bulmak için ise tüm katman bileşenlerinin ısıl kütlesi toplanmalıdır ve şu şekilde gösterilebilir:

$$I_{\text{ısıl Kütlesi}} = C_{th} = \left(\sum_{k=1}^n V_k d_k c_k \right) \quad (5.5)$$

Burada k ilgili katmanı, V_k ilgili katmanın hacmini, d_k öz kütlesini ve c_k ise öz ısı sabitini göstermektedir. Isıl kütle de bulunduktan sonra ısıl zaman sabiti $\tau = I_{\text{ısıl Kütlesi}} / G_{\text{köprü}}$ ilişkisi ile kolaylıkla bulunabilmektedir. Bir sonraki basamakta sistem gürültüsü hesaplanmıştır. Sistem gürültüsünü bulabilmek için Johnson gürültüsü, 1/f gürültüsü, ısıl gürültü ve arka plan gürültüsü hesaplanmalıdır. Filtrelemesi kolay olduğundan 1/f gürültüsü ve etkisi çok az olduğundan arka plan gürültüsü hesaba dahil edilmemiştir. Johnson gürültüsü için Eşitlik 2.20, ısıl gürültü için Eşitlik 2.21 ve bu değerlerin toplamını almak için Eşitlik 2.23 kullanılmaktadır. Tüm bu hesaplar sonucunda farklı fiziksel yapılardaki mikrobolometrelerin karşılaştırılması için kullanılan algılayıcılık D^* değeri şu şekilde hesaplanabilir:

$$D^* = \frac{\text{Voltaj Tepkiselliği} \sqrt{\text{Piksel Alanı} \times \text{Gürültü Bandı}}}{V_{\text{Gürültü}}} \quad (5.6)$$

Bu aşamaya gelindiğinde bir mikrobolometrenin karakterizasyonu ve performans özelliklerinin bulunması için tüm teorik yapı ve test altyapısı anlatılmıştır. Bu basamaklar ile mikrobolometrelerin modellenmesinden karakterizasyonuna, buradan da bu yapıların karşılaştırılmasını sağlayan zaman sabiti ve algılayıcılık değerlerinin bulunmasına kadar tüm işlemler tamamlanmıştır.

5.3 Parametre Tarama Mekanizması

Önceki bölümlerde anlatılan hesaplama yöntemleri ile tezin asıl amacı olan "zifir-altın kaplı amorf silikon mikrobolometrelerinin tasarım parametrelerinin belirlenmesi" kısmı artık hesaplanabilmektedir. Bu bölümde zifir-altın kaplamalı a-Si:H tabanlı bir mikrobolometrenin saniyede 30 kare algılayacak şekilde en yüksek algılayıcılık değeri için gerekli olan fiziksel parametreler bulunacaktır. Bunu yapabilmek için bir önceki bölümde anlatılan hesaplama yöntemleri her parametre değişimi için tekrarlanacaktır. Ayrıca zifir-altın kaplamanın performansını karşılaştırmak için 3 farklı yapıya sahip mikrobolometre kullanılmıştır. Aynı test ortamında yapılan karşılaştırmanın literatürde test ortamı ve tüm sonuçları belirtilmemiş değerlerle karşılaştırmaya göre daha net bir bilgi vereceği düşünülmüştür. Şekil 5.12 ile karşılaştırılacak 3 farklı yapıdaki mikrobolometre gösterilmiştir. Burada "A" tipi zifir-altın emici

Vakum	Vakum	Vakum
Zifir-altın	SiO₂	Si₃N₄
SiO₂	SiO₂	SiO₂
a-Si:H	a-Si:H	a-Si:H
Vakum	Vakum	Vakum
Yansıtıcı	Yansıtıcı	Yansıtıcı
ROIC	ROIC	ROIC
Tip A	Tip B	Tip C

Şekil 5.12: Farklı emici katmana sahip mikrobolometre çeşitleri

tabaka içeren yapıyı, "B" ve "C" tipi emici tabakaların CMOS süreçler ile üretilebildiği yay-

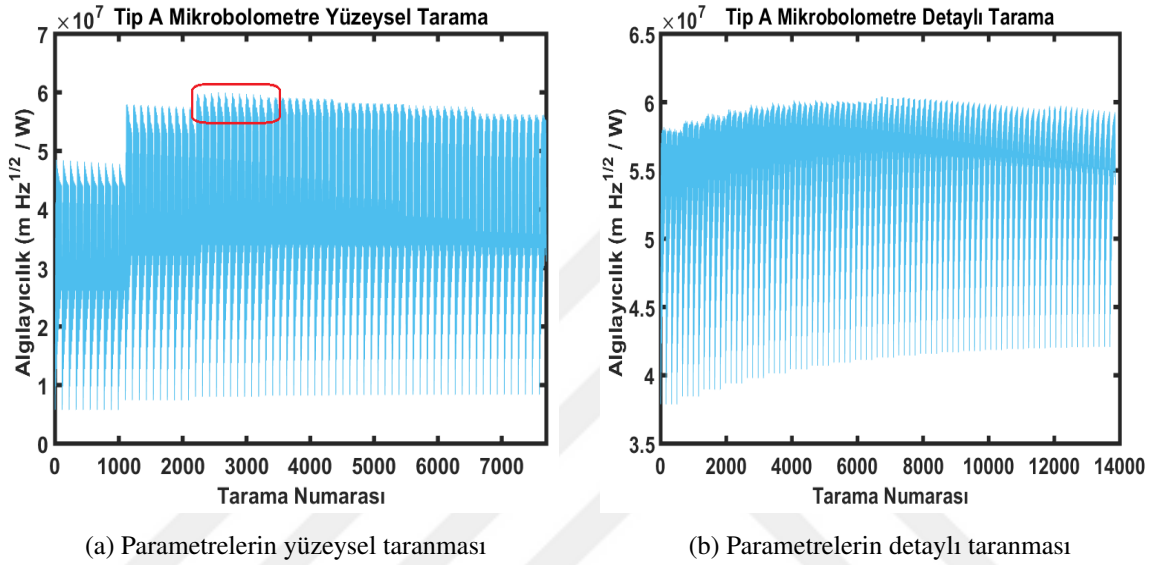
Tablo 5.3: Tarama aralıkları

Özellik	Aralık Taban	Aralık Tavan
Zifir-Altın Kalınlık	0 nm	40 μm
Altın Parçacık Boyutu	10 nm	60 nm
Altın Doluluk Oranı	%0.5	%3
a-Si:H Kalınlık	100 nm	10 μm
SiO ₂ Kalınlık	0 nm	10 μm
Si ₃ N ₄ Kalınlık	0 nm	10 μm
Piksel Boyutu	10 μm x 10 μm	60 μm x 60 μm

gın kullanılan yapıları göstermektedir. "C" tipinde farklı noktalarda plazmon frekansı olan SiO₂ ve Si₃N₄ beraber kullanılarak daha geniş bantlı bir emicilik hedeflenmiştir. Her yapıda bulunan yansıtıcı tabaka üzerinde konumlandırılan "vakum" katmanı 2.5 μm olarak alınmıştır.

Farklı 3 yapı için de en yüksek algılayıcılık değerini ve istenilen zaman sabitini yakalayabilmek için birçok fiziksel özelliğin incelenmesi ve uygun değerlerin seçilmesi gerekmektedir. Buna ek olarak bu yapıların uzak ve orta kızılötesi bantları için ayrı ayrı tasarlanıp karşılaştırılması planlanmıştır. Mikrobolometrelerde parametre seçimi hesaplanması zor bir olgudur. Özellikle birçok parametre aynı anda değiştiği zaman beklenmedik sonuçlar ve performansta hızlı değişimler açığa çıkabilmektedir. Örneğin zifir-altın kaplama kalınlığının artışı, bir noktaya kadar performansı iyileştirse de, bir noktadan sonra getirdiği ek termal kütle yüzünden performansın düşmesine sebep olmaktadır. Başka bir örnek olarak piksel boyutu düşünülebilir. Piksel boyutu değişmesiyle aynı anda a-Si:H katman direnci, termal kütleler, piksel alanından kaynaklanan güç değişimleri, köprü yapılarının boyutlarından kaynaklı ısı dirençler ve birçok değer değişmektedir. Bu değişimlerin hepsini bir anda hesaplayıp doğru değeri bulmak oldukça güçtür. Bu yüzden farklı fiziksel değerlerin mikrobolometre performansına etkisini görüp en uygun değerlerin seçilebilmesi için tez kapsamında birçok parametrenin uygun aralıklar içerisinde taranması planlanmıştır. Tablo 5.3 ile taranacak özelliklerin değerleri ve tarama aralıkları gösterilmiştir. Test süresince "Sıcak obje" sıcaklığı uzak kızılötesi bandı (8 μm -15 μm) için 313 K, orta kızılötesi bandı (3 μm -5 μm) için ise 523 K olarak alınmıştır.

Testler yapılırken bahsedilen özelliklerin taranması için iki kademeli tarama yapılmıştır. İlk kademede tarama aralığı yüzeysel bir şekilde taranmıştır. Böylelikle algılayıcılık değerinin yüksek, zaman sabitinin ise olabildiğinde düşük olduğu bölgeler gözlenmiştir. İkinci kademe olarak hedef bölgelerin etrafında daha küçük basamaklar ile detaylı taramalar yapılmıştır. Bu yöntem 3 ayrı mikrobolometre tipi için hem uzun hem de orta kızılötesi bandında olmak üzere 6 kere tekrarlanmıştır. Şekil 5.13 ile C Tipi mikrobolometrenin örnek taraması gösterilmiştir. Tarama numarası referans için kullanılmış olup karşılık gelen fiziksel değerler



Şekil 5.13: Parametre tarama örneği

gösterilmemiştir. Şekil 5.13a ile gösterilen tarama ilk yüzeysel taramadır. Tarama numarası 2000-3000 aralığına karşılık gelen fiziksel değerler etrafında detaylı tarama yapılarak en yüksek algılayıcılık bulunmuştur. Zaman sabiti burada gösterilmese de ayrıca incelenip iki değer en iyi sonuç verdiği fiziksel parametreler bulunabilmektedir.

5.3.1 Tarama Bulguları

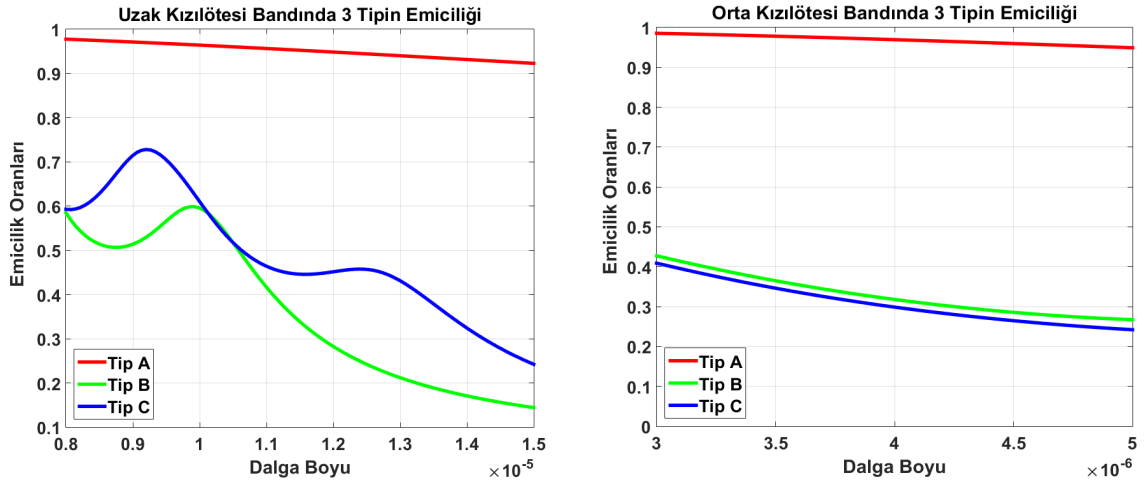
Algılayıcılık ve zaman sabiti değerlerini bulabilmek için anlatılan yöntemler, her değişim için tekrarlanarak en uygun değerlere sahip mikrobolometre yapıları bulunabilmektedir. Tez kapsamında 3 tip mikrobolometre için bu işlem yaklaşık 100.000 kere tekrar edilerek hem uzun hem de orta kızılötesi bandı için sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçları özetleyen değerler Tablo 5.4 ile gösterilmiştir. Tabloda gösterilen değerler 6 ayrı mikrobolometre yapısından

Tablo 5.4: Tarama sonunda elde edilen mikrobolometre parametreleri

Özellik	Birim	Uzak Kızılötesi(8-15 μm)			Orta Kızılötesi(3-5 μm)		
		Tip A	Tip B	Tip C	Tip A	Tip B	Tip C
Algılayıcılık D^*	$cm\sqrt{Hz}/W$	4.9×10^9	1.3×10^9	1.9×10^9	6.1×10^9	0.7×10^9	1.2×10^9
Zaman Sabiti τ	ms	9.6	10.7	10.6	10	10.6	9.8
Piksel Boyutu	$\mu m \times \mu m$	37x37	28x28	27x27	42x42	28x28	28x28
a-Si:H Kalınlığı	μm	0.95	1.82	1.74	0.62	2.24	2.12
SiO ₂ Kalınlığı	μm	0.002	1.2	0.5	0.002	0.55	0.2
Si ₃ N ₄ Kalınlığı	μm	-	-	0.7	-	-	0.32
Zifir-Altın Kalınlığı	μm	15	-	-	7.2	-	-
Altın Doluluk Oranı	%	1.2	-	-	1.3	-	-
Altın Parçacık Boyutu	nm	27	-	-	28	-	-

her birinin en yüksek algılayıcılık ve en düşük zaman sabiti için taranarak bulunmuş fiziksel değerlerini göstermektedir.

Bu değerlerden görülebileceği gibi zifir-altın kaplı a-Si:H mikrobolometre hem uzun, hem de orta kızılötesi bandında diğer modellerden 5 kata kadar daha yüksek algılayıcılık değerine sahiptir. Ayrıca saniyede 30 kare görüntülemek için gerekli 11 ms zaman sabiti de başarı ile yakalanabilmiştir. Zifir-altın diğer tiplere göre çok daha kalın bir kaplama olsa da, seyrekliği sayesinde sisteme yüksek bir ısıl kütle getirmemiştir. Bu fiziksel parametreler ile tasarlanan mikrobolometrelerin emicilik oranları Şekil 5.14 ile gösterilmiştir. İlgili şekil incelenerek zifir-altın kaplamanın ne düzeyde yüksek emiciliğe sahip olduğu görülebilmektedir. Emicilik oranlarında görülebilecek en büyük fark orta kızılötesi bandındadır. Bunun temel sebebi zifir-altın ile kaplama metalik özelliğinden dolayı çok geniş bir spektrumda yüksek emicilik gösterirken, SiO₂ ve Si₃N₄ sadece 8 μm civarlarında plazmon rezonansından kaynaklı emicilik gösterebilmektedir. Bu sebeple orta kızılötesi bandı için zifir-altın diğer modellere karşı daha belirgin bir farkla yüksek algılayıcılığa sahiptir. Bu şekilden yorumlanabilecek bir diğer konu ise zifir-altın kaplamanın diğerlerinden çok daha yüksek emiciliğe sahip olmasına karşı, kısmen daha az yüksek algılayıcılık değerine sahip olmasıdır. Bu durumun temel sebebi a-Si:H katmanının kalınlığıdır. Tip B ve Tip C yapılarında bu katmanın kalınlığı 2 μm mertebelerindeyken, Tip A yapısında 1 μm 'nin altındadır. Bundan dolayı Tip B ve C yapılarında a-Si:H algılayıcı katmanın elektriksel direnci daha az olduğundan gürültü seviyesi

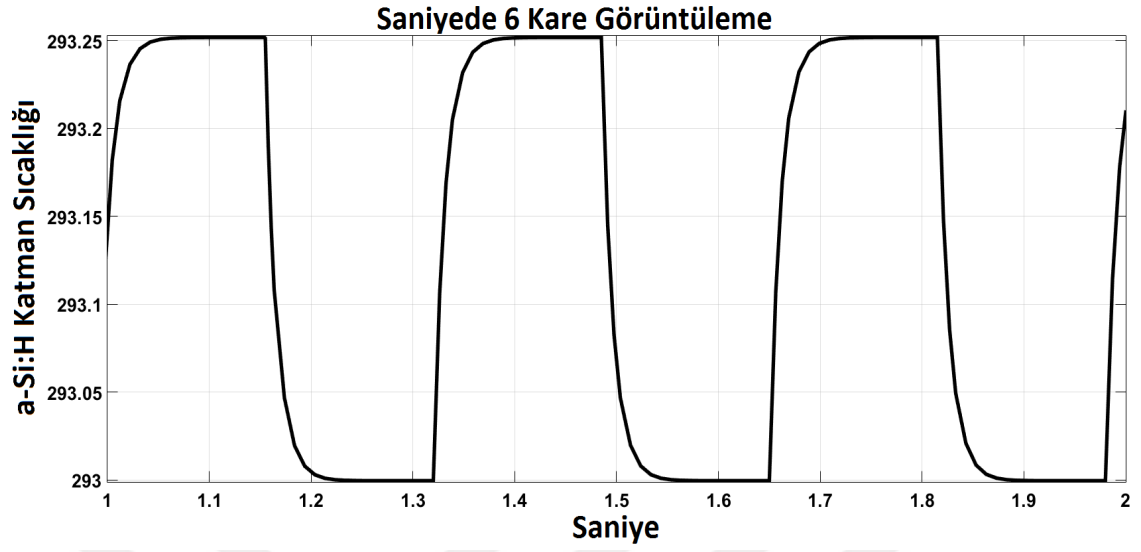


(a) Tasarlanan yapıların uzak kızılötesindeki emicilik (b) Tasarlanan yapıların orta kızılötesindeki emicilik

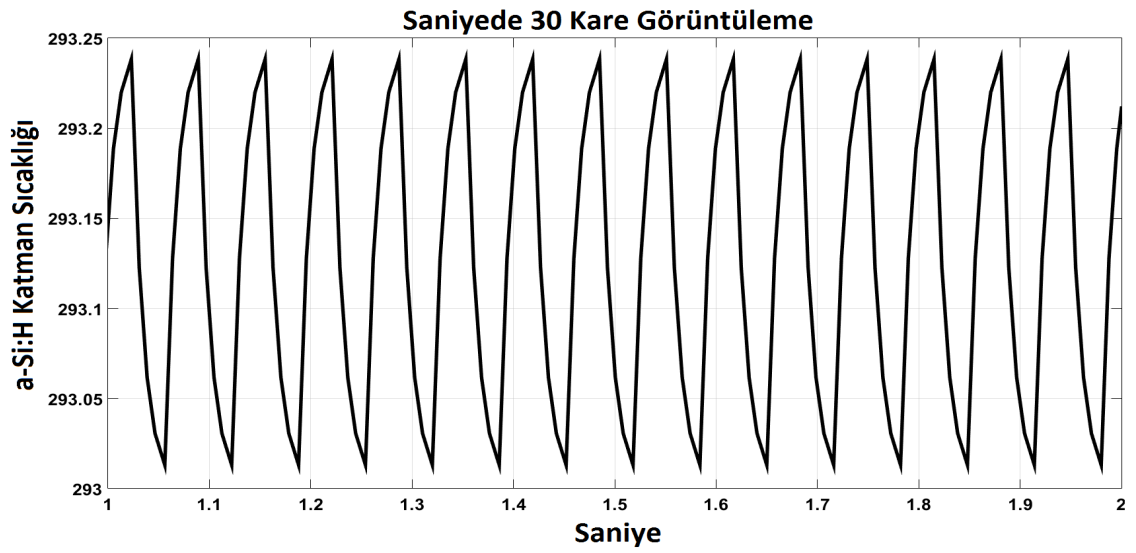
Şekil 5.14: Tip A, B ve C yapılarının orta ve uzak kızılötesindeki emicilik oranları

de dolaylı olarak azalmaktadır. Tip A yapısında ise 11ms zaman sabiti bütçesine uyabilmek için taramalar sonucunda daha ince bir a-Si:H katmanı kullanımına karar verilmiştir. Bu katmanın kalınlaşması, ısı kütlenin artarak zaman sabitinin 11ms değerinin üzerine çıkmasına sebebiyet verecektir. Alternatif olarak 11ms değerini korumak için a-Si:H katmanının kalınlaştırılıp, zifır-altın katmanının inceltilmesi düşünülürse emicilik azalacağından algılayıcılık değerine bir katkı yapılamayacaktır.

Tarama sonucunda uzak kızılötesi için tasarlanmış Tip A mikrobolometresinin saniyede 30 görüntü yakalayabileceğinin göstergesi olarak Şekil 5.15 ve Şekil 5.16 incelenebilir. Bu grafikte a-Si:H katmanının benzetim süresi boyunca kaydedilen sıcaklık grafiği görülmektedir. Saniyede 6 ve 30 karelik görüntü testi elde edebilmek için 3 Hz ve 15 Hz frekanslarında çalıştırılan kesici devresi sayesinde ilgili sıcaklık değişimleri elde edilmiştir. 11ms zaman sabitlik bir yapıdan beklenilebileceği gibi saniyede 6 karelik görüntüde, piksel sıcaklığı denge durumuna gelmiştir. Saniyede 30 kare durumunda ise 3τ uzunluğunda bir süreden sonra başka bir görüntü gelmektedir. Bu süre zarfında piksel sıcaklığı neredeyse dengeye gelmiştir. Tahmin edilebileceği gibi bundan daha yüksek hızlarda değişen görüntülerde piksel üzerindeki sıcaklık değişimi azalacağından algılayıcılık da o oranda azalacaktır.



Şekil 5.15: Saniyede 6 kare görüntüleme (3 Hz kesici) ile test edilen a-Si:H katman sıcaklığı



Şekil 5.16: Saniyede 30 kare görüntüleme (15 Hz kesici) ile test edilen a-Si:H katman sıcaklığı

6. SONUÇLAR

Kızılötesi kameralar her geçen gün endüstride, sivil ve askeri uygulamalarda daha çok kullanılmaya başlanmaktadır. Artan yüksek çözünürlüklü ve algılayıcılıklı kamera talebini karşılamak için mikrobolometre yapılarında yeni emici ve algılayıcı materyal arama çalışmaları da artarak devam etmektedir. a-Si:H tabanlı algılayıcı katmanlar günümüzde kullanılmaya başlanmış olup, üretiminin standart CMOS yöntemler ile yapılabilmesi ve bu materyalin yüksek TCR değerlerine sahip olabilmesi büyük bir avantajdır. Ayrıca uygulama isterlerine göre TCR, direnç, fiziksel boyutlar gibi önemli parametrelerin kolaylıkla ayarlanabilmesi a-Si:H kullanımının artarak devam edeceğinin göstergesidir. Ancak amorf silikon tabanlı algılayıcı katmanlar orta ve uzun kızılötesi bantlarında çok düşük emiciliğe sahiptir. Bu eksikliklerinden dolayı bu bantlarda emiciliği yüksek malzemeler ile kaplanmaları gerekmektedir. Literatürde a-Si:H algılayıcı tabakanın, a-Si:H üretimi gibi CMOS proses ile üretilen SiO_2 ve Si_3N_4 tabakaları ile kaplandığı görülebilmektedir. Gold-black kaplama ise CMOS proses ile üretilmeyen, ancak üretim sıcaklığının düşük olmasından dolayı CMOS proses ile üretilmiş bir yapının zarar görmeden kaplanabilmesine olanak veren bir kaplama çeşididir. Kullanımı kaplama yöntemlerinin gelişmesi ile artmakta olup, literatürde genellikle tek başına üretilip karakterize edilen ya da VO_x algılayıcı tabakanın üzerine kaplanmış bir şekilde karakterize edilen yapılarda kullanılmıştır.

Bu bilgiler eşliğinde tez kapsamında termal kamera tasarımlarında kullanımı çok muhtemel a-Si:H algılayıcı katman ile gold-black kızılötesi emici katmanın ortak performansı incelenmek istenmiştir. Bu incelemeyi yapabilmek için mikrobolometre modellemesi detaylı bir biçimde işlenmiştir. Mikrobolometreyi oluşturan metalik ve dielektrik katmanların plazmon frekansı, sönümleme katsayısı, harmonik osilatör frekansı gibi temel değerlerinden, çok katmanlı yapının istenilen spektrum aralığındaki emiciliğine kadar yapılan basamaklardaki hesaplama yöntemleri doğrulanarak ortaya konmuştur. Buna ek olarak bir mikrobolometrenin algılayıcılık ve zaman sabiti gibi performans parametrelerinin ölçülebilmesi için gerekli test düzeneği sanal ortamda çalıştırılmıştır. Gold-black kaplı a-Si:H tabanlı mikrobolometrenin literatürde bilinen SiO_2 ve Si_3N_4 kaplı mikrobolometrelerden ne düzeyde iyi olduğunu göstermek için karşılaştırmalı testler yapılmıştır.

Farklı fiziksel yapıdaki mikrobolometre tiplerini test edebilmek için tez kapsamında geliştirilen modelleme ve test ortamı kullanılmıştır. Testlerin sonucunda 3 farklı tipte, orta ve uzun kızılötesi bandı için özel tasarlanmış toplamda 6 adet mikrobolometre sonucu çıkarılmıştır. Bahsi geçen yapıların saniyede 30 kare görüntüleyebilmesi için tasarımın zaman sabiti en fazla 11 ms olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Test sonuçlarından yola çıkarak gold-black kaplı a-Si:H tabanlı mikrobolometrelerin diğer tiplere göre 5 kata kadar daha yüksek algılayıcılığa sahip olduğu gözlenmiştir. Dahası gold-black kaplamanın dielektrik kaplamalardan farklı olarak çok geniş bir spektrumda, kolaylıkla kontrol edilebilen bir emicilik grafiği olduğu gösterilmiştir.

Sonuç olarak tez kapsamında bir mikrobolometrenin tasarımının yapılabilmesi için gerekli teorik yapılar oluşturulmuş, mikrobolometrenin performans parametrelerinin ölçülebilmesi için test ortamı geliştirilmiştir. Bu ortam kullanılarak yapılan testlerde gold-black kaplı a-Si:H tabanlı mikrobolometrelerin yüksek emicilik, yüksek algılayıcılık ve düşük zaman sabitine sahip olabileceği gösterilmiştir.

Tezin devamı olarak yapılabilecek çalışmalara şu maddeler gösterilebilir:

- Hızlı bir şekilde tasarımı yapılan mikrobolometrelerin sonuçlarının daha detaylı incelenebilmesi için termal analiz programları kullanılabilir. Bu programlar çok yavaş çalıştığından parametre tarama işlemleri tez kapsamında yapıp sonuçları harici ortamlarda değerlendirilebilir.
- Tasarımı yapılan mikrobolometrenin gürültü kaynaklarını ve dolayısıyla algılayıcılığı daha doğru ölçebilmek için mikrobolometre modeli ROIC modelleri ile birleştirilebilir. Sonuçlar kamera sisteminin geneli hakkında daha doğru bilgi verebilir.
- Son olarak tasarımı yapılan mikrobolometre gerçekten üretilerek modellemenin ne düzeyde doğru çalıştığı incelenebilir. Buradan çıkarılan geri beslemeler ile model daha düzgün bir hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] S. K. Ajmera, A. J. Syllaos, G. S. Tyber, M. F. Taylor, and R. E. Hollingsworth, "Amorphous silicon thin-films for uncooled infrared microbolometer sensors," Proc. SPIE, vol. 7660, p. 766012, 2010.
- [2] B. Fieque, J. L. Tissot, C. Trouilleau, A. Crastes, and O. Legras, "Uncooled microbolometer detector: Recent developments at Ulis", Infr. Phys. Technol., vol. 49, no. 3, pp. 187-191, 2007.
- [3] Iborra, E., Clement, M., Vergara Herrero. L., Sangrador, J., "IR uncooled bolometers based on amorphous $\text{Ge}_{x-1}\text{Si}_x\text{O}_y$ on Silicon Micromachined structures", Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 322-329, 2002.
- [4] K. Oishi, S. Yonemaru, D. Akai, M. Ishida, "SiO₂/SiN Multilayer-Stack Infrared Absorber Integrated on PbO₃ Film Pyroelectric Sensors on Al₂O₃/Si Substrate", Sensors and Materials, Vol. 27, No. 2, pp. 217-227, 2015.
- [5] Evan M. Smith, D. Panjwani, J. Ginn, A. Warren, C. Long, P. Figuieredo, C. Smith, J. Perlstein, N. Walter, C. Hirschmugl, R. E. Peale, D. J. Shelton, "Enhanced performance of VO_x-based bolometer using patterned gold black absorber", Proc. SPIE 9451, Infrared Technology and Applications XLI, 2015.
- [6] Mohamed Abdel-Rahman et al, "Vanadium sesquioxide (V₂O₃)-based semiconducting temperature sensitive resistors for uncooled microbolometers" Modern Physics Letter B 31, 1750145, 2017.
- [7] D. Panjwani, M. Yesiltas, S. Singh, E. D. Barco, R. E. Peale, C. Hirschmugl and H. Sedlemair, "Aging of nano-morphology, resistivity, and far-infrared absorption in gold-black" Infrared Phys. Technol. vol 66 p 1, 2014.
- [8] Herschel, W., "Experiments on the Refrangibility of the Invisible Rays of the Sun.", LL. DFRS. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, p. 284-292, 1800.
- [9] The Electromagnetic Spectrum: the family of light, "<http://www.cyberphysics.co.uk/topics/light/emspect.htm>", Ocak 2018.
- [10] Welding pool measurement using thermal array sensor, "<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9609/960912/Welding-pool-measurement-using-thermal-array-sensor/10.1117/12.2187751.short?SSO=1>", Ocak 2018.
- [11] Dereniak, E. and G. Boreman, "Infrared Detectors and Systems", New York: Wiley and Sons 1996.

- [12] Planck's Law, "https://en.wikipedia.org/wiki/Planck%27s_law", Ocak 2018.
- [13] J.W. Beletic, R. Blank, D. Gulbransen, D. Lee, M. Loose, E.C. Piquette, T. Sprafke, W.E. Tennant, M. Zandian, J. Zino, "Teledyne Imaging Sensor: Infrared imaging technologies for Astronomy-Civil Space", Infrared SPIE, p. 7021-20, 2008.
- [14] R.D. Gehrza, E.E. Becklinb, I. de Paterc, D.F. Lesterd, T.L. Roellige, C.E. Woodward, "A new window on the cosmos: The Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA)", Advances in Space Research 44, pp. 413-431, 2009.
- [15] E.F. Ring and Ammer K, "Infrared thermal imaging in medicine", *Physiol. Meas.* 33, pp. 33-46, 2012.
- [16] Carlo Corsi, "History highlights and future trends of infrared sensors", *Journal of modern optics*, Vol. 57, No. 18, pp. 1663-1686, 2010.
- [17] Mahan, G.D. Lyon, H.B. Jr., "Thermoelectric devices using semiconductor quantum wells", *Journal of Applied Physics*, vol.76, no.3 pp. 1899-1901, 1994.
- [18] S.D. Gunapala, S.V. Bandara, "Quantum Well Infrared Photodetectors (QWIP) Focal Plane Arrays", *Semiconductors and Semimetals*, vol. 62, 1999.
- [19] A. Rogalski, "Infrared thermal detectors versus photon detectors: I. Pixel performance", *Proceedings Volume 3182, Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics*, 1997.
- [20] B. Wiecek, "Advances in infrared technology - quantum well versus thermal detectors" *Proceedings of the Second Joint 24th Annual Conference and the Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society Engineering in Medicine and Biology*, vol.2, pp. 1135-1136, 2002.
- [21] E. Briones et al., "Seebeck nanoantennas for infrared detection and energy harvesting applications," *9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Lisbon, pp. 1-4, 2015.
- [22] Thermopile working principle, "<https://en.wikipedia.org/wiki/Thermopile>", Ocak 2018.
- [23] Midwave thermal infrared detection using semiconductor selective absorption, "<https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-18-22-22833id=206427>", Ocak 2018.
- [24] C. Li, G. D. Skidmore, C. Howard, C. J. Han, L. Wood, D. Peysha, E. Williams, C. Trujillo, J. Emmett, G. Robas, D. Jardine, C.F. Wan, and E. Clarke, "Recent Development of Ultra Small Pixel Uncooled Focal Plane Arrays at DRS", *Proceedings of SPIE*, Vol. 6542, Art. No. 65421Y, 2007.

- [25] S. Tohyama, M. Miyoshi, S. Kurashina, N. Ito, T. Sasaki, A. Ajisawa, and N. Oda, "New Thermally Isolated Pixel Structure for High-Resolution Uncooled Infrared FPAs" Proceedings of SPIE, Vol. 5406, Iss. PART 1, pp. 428-436, 2004.
- [26] A. Rogalski, "Progress in Focal Plane Array Technologies" Progress in Quantum Electronics, Vol. 36, pp. 342-473, 2012.
- [27] M. Kohin and N. Butler, "Performance Limits of Uncooled VOx Microbolometer Focal Plane Arrays," Proceedings of SPIE, Vol. 5406, Iss. PART 2, pp. 447-453, 2004.
- [28] M. Ueno, Y. Kosasamaya, T. Sugino, Y. Nakaki, Y. Fujii, H. Inoue, K. Kama, T. Seto, M. Takeda, and M. Kimata, "640x480 Pixel Uncooled Infrared FPA with SOI Diode Detectors," Proceedings of SPIE, Vol. 5783, Iss. PART II, Art. No. 63, pp. 566-577, 2005.
- [29] Dereniak, E. and G. Boreman, "Infrared Detectors and Systems", New York: Wiley and Sons, 1996.
- [30] P. W. Kruse and D. D. Skatrud, "Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems", Semiconductor and Semimetals, Vol. 47, Academic Press, 1997.
- [31] S. Eminoglu, "Uncooled Infrared Focal Plane Arrays with Integrated Readout Circuitry Using MEMS and Standard CMOS Technologies", Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy, Middle East Technical University, Department of Electrical and Electronics Engineering, 2003.
- [32] Landau, L.D., E. Lifshitz, L. Pitaevskii, "Statistical Physics", Course of Theoretical Physics, Volume 5. 3rd. Edition, 1984.
- [33] Kruse, P.W., "Uncooled thermal imaging: arrays, systems, and applications", Vol. 2003. SPIE press Bellingham, 2001.
- [34] Wood, R., "Monolithic silicon microbolometer arrays", Semiconductors and Semimetals, vol. 47, pp. 43-121, 1997.
- [35] Spear, W.E. and P.G. Le Comber, "Substitutional doping of amorphous silicon", Solid State Communications, 17(9): pp. 1193-1196, 1975.
- [36] Carlson, D.E. and C.R. Wronski, "Amorphous silicon solar cell", Applied Physics Letters, 28(11): p. 671-3, 1976.
- [37] Brady, J., et al. "Advances in amorphous silicon uncooled IR systems", in Infrared Technology and Applications XXV, SPIE-Int. Soc. Opt. Eng, 1999.
- [38] Schimert, T., et al. "Amorphous silicon based large format uncooled FPA microbolometer technology", in Infrared Technology and Applications XXXIV, 2008.

- [39] Moon, S., "Novel infrared absorbing material coupled uncooled microbolometer", Proceedings of the Ieee Sensors, Vols 1-3, pp. 658-660, 2004.
- [40] F.L. Pilar, "Elementary quantum chemistry", McGraw-Hill Book Co, New York, 1968.
- [41] B.L. Crowder, R.S Title, "ESR and optical studies of ion-implanted silicon", Applied Physics Letters 16, 205, 1970.
- [42] R. Grigorovici, "Amorphous Germanium and Silicon (Structure and Transport Phenomena)", Materials Research Bulletin 3, pp. 13-24, 1968.
- [43] R. A. Street, "Hydrogenated Amorphous Silicon" Cambridge University Press, 1991.
- [44] S. Agarwal, S. Sriraman, A. Takano, E. Aydil, D. Maroudas, "Mechanism and activation energy barrier for H abstraction by H(D) from a-Si:H surfaces", Surface Science vol. 515, Iss. 1, pp 469-474, 2002.
- [45] J. Magarino, D. Kaplan, "Doping effects on post-hydrogenated chemical vapor deposited amorphous silicon", Philosophical Magazine B45, pp. 285-306, 1982.
- [46] Cole, B. E.; Higashi, R. E.; Wood, R. A., "Monolithic Two-Dimensional Arrays of Micromachined Microstructures for Infrared Applications" Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 8, pp. 1679-1686, 1998.
- [47] Syllaios, A. J.; Schimert T. R.; Gooch, R. W.; McCardel, W. L.; Ritchey, B. A.; Tregilgas, J. H., "Amorphous silicon microbolometer technology", Proceedings of Materials Research Society - Amorphous and Heterogeneous Silicon Thin Films 2000, Vol. 609, A14.4, 2000.
- [48] M.; Kosarev, A.; Torres, A.; Ambrosio, R. "Comparison of Three Un-Cooled Microbolometers Configurations Based on Amorphous Silicon-Germanium Thin Films Deposited by Plasma", Journal of Non Crystalline Solids, Vol. 354, pp. 2598-2602, 2008.
- [49] J. Müllerová, "Infrared Insight Into The Network Of Hydrogenated Amorphous And Poly Crystalline Silicon Thin Films", Advances in Electrical and Electronic Engineering, pp. 354-357, 2010.
- [50] D. Brassard and M. A. El Khakani, "Dielectric properties of amorphous hydrogenated silicon carbide thin films grown by plasma-enhanced chemical vapor deposition", Journal Of Applied Physics Volume 93, Number 7, 2003.
- [51] Pfund, A.H., "Bismuth Black And Its Applications", Review of Scientific Instruments, 1(7): pp. 397-399, 1930.
- [52] Pfund, A.H., "The Optical Properties of Metallic and Crystalline Powders", Journal of the Optical Society of America, 23(10), pp. 375-377, 1933.

- [53] Harris, L., R.T. McGinnies, B.M. Siegel, "The Preparation and Optical Properties of Gold Blacks", *Journal of the Optical Society of America*, 38(7): p. 582-588, 1948.
- [54] Ashcroft, N.W.M., N. D., "Solid State Physics", ed. Brooks/Cole, New York, 1976.
- [55] Panjwani, Deep., Mehmet Yesiltas, Simranjit Singh, Enrique Del Barco, R. E. Peale, Carol Hirschmugl, Julia Sedlemair, "Stencil Lithography of gold-black IR absorption coatings" *Infrared Physics-Technology*, Vol. 66, pp. 1-5, 2014.
- [56] David K. Cheng, "Field and Wave Electromagnetics", 2. ed., Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
- [57] Liz-Marzán, L.M., "Nanometals: Formation and color", *Materials Today*, 7(2): p. 26-31, 2004.
- [58] Kuwata, H., et al., "Resonant light scattering from metal nanoparticles: Practical analysis beyond Rayleigh approximation", *Applied Physics Letters*, 83(22): pp. 4625-4627, 2003.
- [59] P. G. Etchegoin, E. C. Le Ru, and M. Meyer, "An analytic model for the optical properties of gold", *The Journal Of Chemical Physics* 125, 2006.
- [60] H. C. van de Hulst, "Light Scattering by Small Particles", Dover Publications, 1981.
- [61] Looyenga, H., "Dielectric constants of heterogeneous mixtures", *Physica*, 31(3): pp. 401-406, 1965.
- [62] Myron J. Rand, "Spectrophotometric Thickness Measurement for Very Thin SiO₂ Films on Si", *Journal of Applied Physics* 41, p. 787, 1970.
- [63] Hopkins, P.E., et al., "Thermal Conductivity in Nanoporous Gold Films during Electron-Phonon Nonequilibrium", *Journal of Nanomaterials*, 2008.
- [64] Harris, Louis and John K. Beasley, "The Infrared Properties of Gold Smoke Deposits" *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 42, pp. 134-140, 1952.
- [65] D. F. Swinehart, "The Beer-Lambert Law", *J. Chem. Educ.*, 39(7), p. 333, 1962.
- [66] H. Fujiwara, "Spectroscopic Ellipsometry, Principles and Applications", Wiley-Sons, 2007.
- [67] D.K. Schroder, "Semiconductor Material and Device Characterization", Wiley-Sons, p. 469, 1990.
- [68] Harris, Louis and Kermit F. Cuff, "Reflectance of Goldblack Deposits, and Some Other Materials of Low Reflectance from 254m μ to 1100m μ . The Scattering-Unit-Size in Goldblack Deposits" *Journal of The Optical Society of America*, Vol. 46, pp. 160-163, 1956.

- [69] Nelms, N. and J. Dowson, "Goldblack coating for thermal infrared detectors", *Sensors and Actuators A*, Vol. 120, pp. 403-407, 2005.
- [70] Becker, W., R. Fettig, and W. Ruppel, "Optical and electrical properties of black gold layers in the far infrared", *Infrared Physics-Technolog.*, Vol. 40 pp. 431-445, 1999.
- [71] Ilias, S., P. Topart, C. Larouche, P. Beaupré, D. Gay, C. Proulx, T. Pope, C. Alain "Deposition and Characterization of gold-black coatings for thermal infrared detectors", *SPIE*, Vol. 7750, 2010.
- [72] Neli, Roberto R., Ioshiaki Doi, Jose A. Diniz, and Jacobus W. Swart, "Development of process for far infrared sensor fabrication" *Sensors and Actuators*, Vol. 132, pp. 400-406, 2006.
- [73] Hopkins, P.E., et al., "Thermal Conductivity in Nanoporous Gold Films during Electron-Phonon Nonequilibrium", *Journal of Nanomaterials*, 2008.
- [74] Wang, J., et al., "Effect of thermal coarsening on the thermal conductivity of nanoporous gold", *Journal of Materials Science*, 47(12): pp. 5013-5018, 2012
- [75] Ristau, R., et al., "Electron microscopy studies of the thermal stability of gold nanoparticle arrays", *Gold Bulletin*, 42(2): pp. 133-143, 2009
- [76] C. J. Clukay, C.N.G., D. J. Freppon, A. Bhattacharya, S.M. Kuebler, H. Heinrich, "Nanoscale characterization of gold nanoparticles created by in situ reduction at a polymeric surface", *Journal of Microscopy*, 251(1): pp. 27-34, 2013.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Zeynep Çiğdem TOĞRUL

Doğum Yeri: Ankara, Türkiye

Medeni Hali: Evli

E-Posta: zeynepyakisir@outlook.com

Adresi: Aselsan A.Ş. Macunköy Yerleşkesi, Yenimahalle - ANKARA

Eğitim

Lise: Gölbaşı Anadolu Lisesi - 2007

Lisans: Hacettepe Üniversitesi - 2013

Y. Lisans: Hacettepe Üniversitesi - 2018

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce: İleri

İş Deneyimi

2014- ASELSAN A.Ş. Test-Analiz Mühendisi

Deneyim Alanları

Otomatik test sistemleri

Fonksiyonel ve çevre koşulları test sistemleri

Yalın üretim yöntemleri

Elektronik kart ve birim üretim yöntem ve süreçleri

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih:17/05/2018

Tez Başlığı / Konusu: ZİFİR-ALTIN KAPLAMALI SOĞUTMASIZ BOLOMETRELERİN OPTİK MODELLENMESİ

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 74 sayfalık kısmına ilişkin, 17/05/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 0 'dır.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

17.05.2018

Adı Soyadı: Zeynep Çiğdem TOĞRUL

Öğrenci No: N13220477

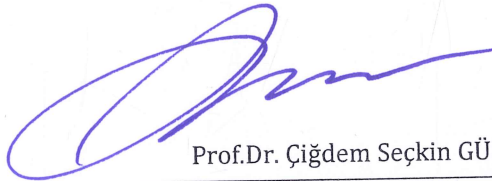
Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Programı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.



Prof.Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL

(Unvan, Ad Soyad, İmza)