OPTİK YÖNTEMLERLE 2-5 μm SPEKTRAL ARALIKTA CO2 GAZI ALGILAMA

Duygunur ÖZDEMİR



T.C. BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OPTİK YÖNTEMLERLE 2-5 μm SPEKTRAL ARALIKTA CO2 GAZI ALGILAMA

Duygunur ÖZDEMİR 0000-0001-8127-7949

Prof. Dr. Muhitdin Ahmetoğlu (Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ OPTİK VE FOTONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024 Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Duygunur ÖZDEMİR tarafından hazırlanan "OPTİK YÖNTEMLERLE 2-5 µm SPEKTRAL ARALIKTA CO₂ GAZI ALGILAMA" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Optik ve Fotonik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU

Başkan	:	Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU 0000-0002-9555-6903 Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Anabilim Dalı	İmza
Üye	:	Prof. Dr. Kadir ERTÜRK 0000-0002-3827-3501 Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Anabilim Dalı	İmza
Üye	:	Doç. Dr. Umut AYDEMİR 0000-0001-5396-4610 Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali KARA Enstitü Müdürü ../../...

B.U.Ü. 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 üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

20/02/2024 Duygunur ÖZDEMİR

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge" kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Muhitdin Ahmetoğlu 20/02/2024

Duygunur ÖZDEMİR 20/02/2024

İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OPTİK YÖNTEMLERLE 2-5 µm SPEKTRAL ARALIKTA CO2 GAZI ALGILAMA

Duygunur ÖZDEMİR

Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Optik ve Fotonik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU

Bu tez çalışmasında tatsız, renksiz ve kokusuz bir gaz olan karbondioksitin (CO₂) optik bir ölçüm yöntemi olan kızılötesi (IR) tespit yöntemiyle ev, okul, iş yerleri, sanayi, maden bölgesi vb. yerlerde herhangi bir gaz sızıntısı durumunda can kayıplarının önlenmesi ve çevre kirliliğinin önüne geçilmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmada dedektör olarak fotodiyot ve termopil, ışık kaynağı olarak halojen ampul ve monokromatör kullanılarak yakın ve orta IR bölgelerde çalışmalar yapılacaktır. Çeşitli optik hücre tasarımları kullanılacak ve ortama akış ölçer ile CO₂ verilecektir. Dedektör çıkış sinyali ile o andaki CO₂ akış değeri not alınarak dedektör çıkış sinyalinin ortamdaki CO₂ miktarına bağlı değişimi gösterilecektir.

Ölçüm ortamındaki CO₂ miktarı arttıkça detektörün çıkış sinyalinin doğrusal olarak azalması gösterilecektir.

Anahtar Kelimeler: Gaz algılama, CO₂, IR yöntem 2024, xvi + 78 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

CO2 GAS SENSING IN THE 2- 5 μm SPECTRAL RANGE WITH OPTICS METHODS

Duygunur ÖZDEMİR

Bursa Uludag University Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Optical and Photonics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU

In this thesis study, carbon dioxide (CO2), a tasteless, colorless and odorless gas, is detected in homes, schools, workplaces, industries, mining areas, etc., by using infrared (IR) detection method, which is an optical measurement method. It is aimed to prevent loss of life and environmental pollution in case of any gas leak in places.

Studies will be carried out in the near and mid-infrared regions by using photodiode and thermopile as detectors, led, halogene bulb and monochromator as light source. Various optical cell designs will be used and CO_2 will be given to the environment by flowmeter. The output voltage over the detector and the current carbon dioxide flow value will be noted, and graphs of variation of the signal with the amount of CO_2 will be drawn.

It will be shown that the output signal on the detector decreases linearly as the amount of carbon dioxide in the measurement medium increases.

Key words: Gas detection, CO₂, IR method 2024, xvi + 78 pages.

TEŞEKKÜR

Öncelikle beni yüksek lisans öğrencisi olarak kabul eden, tez çalışmam boyunca değerli bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını esirgemeyen, danışman hocam Sn. Prof. Dr. Muhitdin AHMETOĞLU'na, teşekkür ederim.

İş hayatım boyunca yüksek lisansa vakit ayırmamı sağlayan ve beni destekleyen başta Elektronik Tasarım ekip arkadaşlarım olmak üzere tüm MARELLİ MAKO'ya teşekkür ederim.

Bu tezin yazım aşamasında bana yardım eden, benimle fikirlerini paylaşan ve beni motive eden Optik Tasarım Mühendisi Sn. Dr. Erhan TİRYAKİ'ye teşekkür ederim.

Görsel tasarımlarda desteklerini esirgemeyen, iş arkadaşım Optik Tasarım Mühendisi Sn. Şevket ÇALIŞKAN'a teşekkür ederim.

Son olarak da bugünlere gelmemde büyük emekleri olan, beni hiçbir zaman yalnız hissettirmeyen ve verdiğim her kararda arkamda durduklarını bildiğim babam Adem ÖZDEMİR ve annem Gülay ÖZDEMİR'e, hayatımın her anında yüzümü güldüren kıymetli kardeşim Berat ÖZDEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Duygunur ÖZDEMİR 20/02/2024

	Sayfa
ÖZET	vi
	V11
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GIRÍŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.2. Gaz Sensör Cesitleri	3
2.2.1. Katalitik Boncuk Gaz Sensörleri	3
2.2.2. Elektrokimyasal Gaz Sensörleri	5
2.2.3. Yarıiletken Gaz Sensörleri	6
2.2.4. Optik Gaz Sensörleri	7
2.3 CO2 Gazı İçin Uygun Yöntemin Belirlenmesi	8
2.4. IR Spektroskopi	9
2.4.1. IR Spektroskopi Tarihçesi	9
2.4.2 IR Soğurma Spektroskopisinin Temelleri	11
2.4.1. CO ₂ Moleküler Titreşimi	15
2.5. IR Gaz Sensör Sistemi için Kaynak Türleri 2.5.1. Termal IR Kaynaklar	16 17
2.5.2. Yarıiletken IR Kaynaklar	22
2.6. IR Gaz Sensör Sistemi için Dedektör Türleri 2.6.1. Termal Dedektörler	25 25
2.6.2. Fotodedektörler	32
2.7. Optik Gaz Hücre Tasarımları	45
2.7.1. Yüz Yüze Gaz Hücresi	46
2.7.2. Düzlemsel Gaz Hücresi	47
2.7.3. Boşluklu Gaz Hücresi	48
2.8. NDIR Yöntem	51
2.8.1. NDIR için Beer- Lambert Yasası	52
2.8.2. NDIR Gaz Ölçüm Sistemlerinin Performansı	56
3. MATERYAL ve YÖNTEM	58
3.1. CO2 Ortamında Halojen Ampul- Termopilden Oluşan Ölçüm Sistemi	58
3.2. Monokromatör ve Fotodiyottan Oluşan Ölçüm Sistemi	61
3.3. CO2 Ortamında Halojen Ampul ve Termopilden Oluşan Ölçüm Sistemi	62
3.4. PWM'li Işık Kaynağı ve Fotodiyottan Oluşan Ölçüm Sistemi	63
3.5. Halojen Ampul ve Termopilden Oluşan Sistemi	65
3.6. 3,9 µm Referans Dalgaboyu İçeren Ölçüm Sistemi	66

İÇİNDEKİLER

4. BULGULAR ve TARTIŞMA	
5. SONUÇ	74
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
AlGaAs	Alüminyum galyum arsenit
Å	Angstrom
Bi	Bizmut
с	Işık hızı
CH ₄	Metan
Cl_2	Klor
CO	Karbonmonoksit
CO_2	Karbondioksit
CS2	Karbondisülfür
D*	Algılayabilirlik
Е	Foton enerjisi
f	Frekans
G _{th}	Termal üretim hızı
Gop	Optik üretim hızı
GaAs	Galyum Arsenit
Н	Planck sabiti
H_2S	Hidrojen sülfür
HCN	Hidrojen siyanür
Hg	Cıva
Ι	Akım
InAlAs	İndiyum alüminyum arsenit
InGaAs	İndiyum galyum arsenit
InSb	İndiyum antimonid
N_2	Nitrojen
NH ₃	Amonyak
NO	Azot monoksit
NO_2	Azot dioksit
O_2	Oksijen
Po	Optik güç
q	Elektron yükü
R	Dedektör Duyarlılığı
Sb	Antimon
Si	Silisyum
Si ₃ N ₄	Silisyum nitrür
SO_2	Kükürt dioksit
α	Soğurma katsayısı
η	Kuantum verimliliği
λ	Dalga boyu

Kısaltmalar Açıklama

bkz	bakınız
FA	Fraksiyonel absorbans
CMOS	Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken

CW	Sürekli Dalga
DOF	Serbestlik Derecesi
eV	Elektron volt
FIR	Uzak Kızılötesi
IR	Kızılötesi
LED	Işık Saçan Diyot
m	Metre
mm	Milimetre
MEMS	Mikro Elektro Mekanik Sistem
MIR	Orta Kızılötesi
MOS	Metal Oksit Sensör
nA	Nano amper
NDIR	Dağılmayan Kızılötesi
NEP	Gürültü Eşdeğer Gücü
nm	Nanometre
NIR	Yakın Kızılötesi
OPO	Optik Parametrik Osilatör
ра	Piko amper
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
QWIP	Kuantum Kuyusu Kızılötesi Fotodiyot
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
UV	Ultraviyole
V	Volt
VOC	Uçucu organik bileşikler
vd	Ve diğerleri
W	Watt
μm	Mikrometre
μs	Mikrosaniye

ŞEKİLLER

DİZİNİ

 Şekil.2.1. Katalitik sensör yapısı		
 Şekil.2.2. Elektrokimyasal sensör yapısı Şekil.2.3. Yarı iletken sensör yapısı Şekil.2.4. Optik gaz algılama sistemi. Şekil.2.5. William W. Coblentz (Wikipedia contributors, 2022). Şekil.2.6. Gazların soğurma spektrumları. Şekil.2.7. Elektromanyetik spektrum içindeki IR bölgeler. Şekil.2.8. Esneme titreşimi. Şekil.2.9. a) Düzlem dışı ve b) düzlem içi eğilme titreşimleri. Şekil.2.10. Makaslama titreşimi. Şekil.2.11. Burulma titreşimi. Şekil.2.12. CO2'nin temel salınımları. Şekil.2.13. CO2 soğurma bantları. Şekil.2.14. Lambanın elektriksel bağlantı şeması. Şekil.2.15. Nernst Lambası (Nernst Lamp Science Museum Group Collection, n.d.). Şekil.2.16. SiC Globar. Şekil.2.17. Kara cisim ve Globar spektral güç dağılımı. Şekil.2.18. Tungsten-Halojen lambanın sıcaklığına bağlı spektral dağılım. Şekil.2.19. 8 Hz'de modüle edilmiş iki termal kaynak, 1 mm2 alana sahip bir vakumda 2300 K'de bir tungsten tipi filaman ve 4 mm2 alana sahip 800 K'de gir cisim kaynağı (Crowder, 2006) Şekil.2.20. MEMS tabanlı mikro ıstıtı yapısı. Şekil.2.21. Heteroyapılı LED'in bağlantı şeması ve rekombinasyon olayının gösterimi. Şekil.2.23. Heteroyapılı LED'in rekombinasyon olayının gösterimi. Şekil.2.24. Termal dedektörün şematik diyagramı. Şekil.2.25. Bolometre yapısı. Şekil.2.26. Diç bolometre malzeme tipinin direncinin sıcaklığa bağımlığığı doyalski, 2012). Şekil.2.28. Bir termoçif dedektörünün çalışma prensibi. Şekil.2.30. Piroelektrik optik sensörünün tipik çalışması (Thermopile Sensor Physics, n.d.). Şekil.2.34. Piroelektrik optik sensörün tipik sinyal davranışı. Şekil.2.35. Yari iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak 	Şekil.2.1.	Katalitik sensör yapısı
 Şekil.2.3. Yarı iletken sensör yapısı	Şekil.2.2.	Elektrokimyasal sensör yapısı
 Şekil.2.4. Optik gaz algılama sistemi	Şekil.2.3.	Yarı iletken sensör yapısı
 Şekil.2.5. William W. Coblentz (Wikipedia contributors, 2022)	Şekil.2.4.	Optik gaz algılama sistemi
 Şekil.2.6. Gazların soğurma spektrumları	Şekil.2.5.	William W. Coblentz (Wikipedia contributors, 2022)
 Şekil.2.7. Elektromanyetik spektrum içindeki IR bölgeler	Sekil.2.6.	Gazların soğurma spektrumları
 Şekil.2.8. Esneme titreşimi. Şekil.2.9. a) Düzlem dışı ve b) düzlem içi eğilme titreşimileri. Şekil.2.10. Makaslama titreşimi. Şekil.2.11. Burulma titreşimi. Şekil.2.12. CO2'nin temel salınımları. Şekil.2.13. CO2 soğurma bantları. Şekil.2.14. Lambanın elektriksel bağlantı şeması. Şekil.2.15. Nernst Lambası (Nernst Lamp Science Museum Group Collection, n.d.). Şekil.2.16. ŞiC Globar. Şekil.2.17. Kara cisim ve Globar spektral güç dağılımı. Şekil.2.18. Tungsten- Halojen lambanın sıcaklığına bağlı spektral dağılımı. Şekil.2.19. 8 Hz'de modüle edilmiş iki termal kaynak, 1 mm2 alana sahip bir vakumda 2300 K'de bir tungsten tipi filaman ve 4 mm2 alana sahip bir vakumda 2300 K'de bir tungsten tipi filaman ve 4 mm2 alana sahip bir vakumda 2300 K'de bir tungsten tipi filaman ve 4 mm2 alana sahip bir vakumda 2300 K'de gri cisim kaynağı (Crowder, 2006). Şekil.2.20. MEMS tabanlı mikro ısıtıcı yapısı. Şekil.2.21. Heteroyapılı LED'in rekombinasyon olayının gösterimi. Şekil.2.23. IBSG markasına ait çeşitli orta IR bölgedeki LED'lerin spektral yayılımı. Şekil.2.24. Termal dedektörün şematik diyagramı. Şekil.2.25. Bolometre malzeme tipinin direncinin sıcaklığa bağımlılığı (Rogalski, 2012). Şekil.2.28. Bir termopil sensörünün tipik çalışması (Thermopile Sensor Physics, n.d.). Şekil.2.30. Piroelektrik dedektör sisteminin yapısı. Şekil.2.31. Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı Şekil.2.32. P- n fotodiyottaki foton soğurulması. Şekil.2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP. Şekil.2.35. Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak 	, Sekil.2.7.	Elektromanyetik spektrum icindeki IR bölgeler
 Şekil.2.9. a) Düzlem dışı ve b) düzlem içi eğilme titreşimleri. Şekil.2.10. Makaslama titreşimi. Şekil.2.11. Burulma titreşimi. Şekil.2.12. CO2'nin temel salınımları. Şekil.2.13. CO2 soğurma bantları. Şekil.2.14. Lambanın elektriksel bağlantı şeması. Şekil.2.15. Nernst Lambası (Nernst Lamp Science Museum Group Collection, n.d.). Şekil.2.16. SiC Globar. Şekil.2.17. Kara cisim ve Globar spektral güç dağılımı. Şekil.2.18. Tungsten- Halojen lambanın sıcaklığına bağlı spektral dağılımı. Şekil.2.19. 8 Hz'de modüle edilmiş iki termal kaynak, 1 mm2 alana sahip bir vakumda 2300 K'de bir tungsten tipi filaman ve 4 mm2 alana sahip 800 K'de gri cisim kaynağı (Crowder, 2006). Şekil.2.20. MEMS tabanlı mikro ısıtıcı yapısı. Şekil.2.21. Homoeklem LED'in bağlantı şeması ve rekombinasyon olayının gösterimi. Şekil.2.22. Heteroyapılı LED'in rekombinasyon olayının gösterimi. Şekil.2.23. Bolometre yapısı. Şekil.2.24. Termal dedektörün şematik diyagramı. Şekil.2.25. Bolometre yapısı. Şekil.2.26. Üç bolometre malzeme tipinin direncinin sıcaklığa bağımlılığı (Rogalski, 2012). Şekil.2.28. Bir termopil sensörünün tipik çalışması (Thermopile Sensor Physics, n.d.). Şekil.2.30. Piroelektrik dedektör sisteminin yapısı. Şekil.2.31. Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı Şekil.2.32. P. n fotodiyottaki foton soğurulması. Şekil.2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP. Şekil.2.35. Yarı iletkenlerde fotouyarılma. Şekil.2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP. Şekil.2.36. Yarı iletkenlerde fotouyarılma. 	Sekil.2.8.	Esneme titresimi
 Sekil.2.10. Makaslama titreşimi	Şekil 2.9	a) Düzlem dışı ve b) düzlem içi eğilme titresimleri
 Sekil.2.11. Burulma titreşimi	Şekil 2 10	Makaslama titresimi
 Sekil.2.12. CO2'nin temel salmımları. Şekil.2.13. CO2 soğurma bantları. Şekil.2.14. Lambanın elektriksel bağlantı şeması. Şekil.2.15. Nernst Lambası (Nernst Lamp Science Museum Group Collection, n.d.). Şekil.2.16. SiC Globar. Şekil.2.17. Kara cisim ve Globar spektral güç dağılımı. Şekil.2.18. Tungsten- Halojen lambanın sıcaklığına bağlı spektral dağılımı. Şekil.2.19. 8 Hz'de modüle edilmiş iki termal kaynak, 1 mm2 alana sahip bir vakumda 2300 K'de bir tungsten tipi filaman ve 4 mm2 alana sahip 800 K'de gri cisim kaynağı (Crowder, 2006). Şekil.2.20. MEMS tabanlı mikro ısıtıcı yapısı. Şekil.2.21. Homoeklem LED'in bağlantı şeması ve rekombinasyon olayının gösterimi. Şekil.2.22. Heteroyapılı LED'in rekombinasyon olayının gösterimi. Şekil.2.23. IBSG markasına ait çeşitli orta IR bölgedeki LED'lerin spektral yayılımı. Şekil.2.24. Termal dedektörün şematik diyagramı. Şekil.2.25. Bolometre yapısı. Şekil.2.26. Üç bolometre malzeme tipinin direncinin sıcaklığa bağımlılığı (Rogalski, 2012). Şekil.2.28. Bir termopil sensörünün tipik çalışmaşı (Thermopile Sensor Physics, n.d.). Şekil.2.30. Piroelektrik dedektörü sisteminin yapısı. Şekil.2.31. Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı Şekil.2.32. AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılama. Şekil.2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP. Şekil.2.36. Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak 	Şekil 2 11	Burulma titresimi
 Sckil.2.12. CO2 min tener sammination (CO2 min tener sammination) Sekil.2.13. CO2 soğurma bantları	Şekil 2 12	CO2'nin tamal salunmlar
 Sekil.2.13. CO2 sögurna bantari. Şekil.2.14. Lambanın elektriksel bağlantı şeması. Şekil.2.15. Nernst Lambası (Nernst Lamp Science Museum Group Collection, n.d.). Şekil.2.16. SiC Globar. Şekil.2.17. Kara cisim ve Globar spektral güç dağılımı. Şekil.2.18. Tungsten- Halojen lambanın sıcaklığına bağlı spektral dağılımı. Şekil.2.19. 8 Hz'de modüle edilmiş iki termal kaynak, 1 mm2 alana sahip bir vakumda 2300 K'de bir tungsten tipi filaman ve 4 mm2 alana sahip 800 K'de gri cisim kaynağı (Crowder, 2006). Şekil.2.20. MEMS tabanlı mikro ısıtıcı yapısı. Şekil.2.21. Homoeklem LED'in bağlantı şeması ve rekombinasyon olayının gösterimi. Şekil.2.22. Heteroyapılı LED'in rekombinasyon olayının gösterimi. Şekil.2.23. IBSG markasına ait çeşitli orta IR bölgedeki LED'lerin spektral yayılımı. Şekil.2.24. Termal dedektörün şematik diyagramı. Şekil.2.25. Bolometre yapısı. Şekil.2.26. Üç bolometre malzeme tipinin direncinin sıcaklığa bağımlılığı (Rogalski, 2012). Şekil.2.28. Bir termopil sensörünün tipik çalışması (Thermopile Sensor Physics, n.d.). Şekil.2.29. Piroelektrik dedektör sisteminin yapısı. Şekil.2.30. Piroelektrik doşik sensörün tipik sinyal davranışı. Şekil.2.31. Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı Şekil.2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP. Şekil.2.35. Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak 	Şekil 2.12.	
 Şekil.2.14. Lambası (Nernst Lamp Science Museum Group Collection, n.d.). Şekil.2.15. SiC Globar	$S_{ch} = 12.13$.	
 Sekil.2.13. Pernst Lampasi (Nernst Lamp Science Museum Group Collection, n.d.). Şekil.2.16. SiC Globar. Şekil.2.17. Kara cisim ve Globar spektral güç dağılımı. Şekil.2.18. Tungsten- Halojen lambanın sıcaklığına bağlı spektral dağılımı. Şekil.2.19. 8 Hz'de modüle edilmiş iki termal kaynak, 1 mm2 alana sahip bir vakumda 2300 K'de bir tungsten tipi filaman ve 4 mm2 alana sahip 800 K'de gri cisim kaynağı (Crowder, 2006). Şekil.2.20. MEMS tabanlı mikro ısıtıcı yapısı. Şekil.2.21. Homoeklem LED'in bağlantı şeması ve rekombinasyon olayının gösterimi. Şekil.2.22. Heteroyapılı LED'in rekombinasyon olayının gösterimi. Şekil.2.23. IBSG markasına ait çeşitli orta IR bölgedeki LED'lerin spektral yayılımı. Şekil.2.24. Termal dedektörün şematik diyagramı. Şekil.2.25. Bolometre malzeme tipinin direncinin sıcaklığa bağımlılığı (Rogalski, 2012). Şekil.2.26. Üç bolometre malzeme tipinin direncinin sıcaklığa bağımlılığı (Rogalski, 2012). Şekil.2.29. Piroelektrik dedektör sisteminin yapısı. Şekil.2.30. Piroelektrik detki foton soğurulması. Şekil.2.31. Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı Şekil.2.32. P- n fotodiyottaki foton soğurulması. Şekil.2.33. AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılama. Şekil.2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP. Şekil.2.36. Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak 	ŞCKII.2.14. Salai 2-15	Normat Lambagi (Normat Lamp Solar of Museum Crassi
 Sekil.2.16. SiC Globar	şekii.2.13.	Collection n d)
 Sekil.2.10. SIC Globar. Şekil.2.17. Kara cisim ve Globar spektral güç dağılımı Şekil.2.18. Tungsten- Halojen lambanın sıcaklığına bağlı spektral dağılımı Şekil.2.19. 8 Hz'de modüle edilmiş iki termal kaynak, 1 mm2 alana sahip bir vakumda 2300 K'de bir tungsten tipi filaman ve 4 mm2 alana sahip 800 K'de gri cisim kaynağı (Crowder, 2006) Şekil.2.20. MEMS tabanlı mikro ısıtıcı yapısı. Şekil.2.21. Homoeklem LED'in bağlantı şeması ve rekombinasyon olayının gösterimi. Şekil.2.22. Heteroyapılı LED'in rekombinasyon olayının gösterimi Şekil.2.23. IBSG markasına ait çeşitli orta IR bölgedeki LED'lerin spektral yayılımı. Şekil.2.24. Termal dedektörün şematik diyagramı. Şekil.2.25. Bolometre yapısı. Şekil.2.26. Üç bolometre malzeme tipinin direncinin sıcaklığa bağımlılığı (Rogalski, 2012) Şekil.2.28. Bir termopil sensörünün tipik çalışması (Thermopile Sensor Physics, n.d.). Şekil.2.30. Piroelektrik dedektör sisteminin yapısı. Şekil.2.31. Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı Şekil.2.33. AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılama Şekil.2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP Şekil.2.36. Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak 	Salvil 2 16	Collection, n.d.).
 Şekil.2.17. Kara cısım ve Globar spektral güç dağılımı	Sekii.2.10.	
 Şekil.2.18. Tungsten- Halojen lambanın sıcaklığına bağlı spektral dağılımı	Şekii.2.1/.	Kara cısım ve Globar spektral güç dağılımı
Sekil.2.19.dagiimiSekil.2.19.8 Hz'de modüle edilmiş iki termal kaynak, 1 mm2 alana sahip bir vakumda 2300 K'de bir tungsten tipi filaman ve 4 mm2 alana sahip 800 K'de gri cisim kaynağı (Crowder, 2006)	Şek11.2.18.	i ungsten- Halojen lambanin sicakligina bağlı spektral
 şekil.2.19. 8 riz de module edilmiş iki termai kaynak, 1 mm2 alana sahip bir vakumda 2300 K'de bir tungsten tipi filaman ve 4 mm2 alana sahip 800 K'de gri cisim kaynağı (Crowder, 2006)	Sale:1 2 10	aggiiimi.
 samp bir vakunda 2500 K de bir tungsten upi mämän ve 4 mm2 alana sahip 800 K'de gri cisim kaynağı (Crowder, 2006)	Şekii.2.19.	o riz de module edilmiș iki termal kaynak, 1 mm2 alana
Anni 2 anana samp soo K de gri cisim kaynagi (Crowder, 2006)Şekil.2.20.MEMS tabanlı mikro ısıtıcı yapısı		samp on vakumua 2000 K de ori eisim kovnoži (Crowder
 Şekil.2.20. MEMS tabanlı mikro ısıtıcı yapısı		niniz arana samp ooo K de gri cisini kaynagi (Crowder,
 Şekil.2.20. MEMS tabahi mikro istuci yapısı	Sabil 2 20	MEMS tohon! milero usition vones
 Şekil.2.21. Fromoektem LED in bagranti şemasi ve rekomolnasyon olayının gösterimi Şekil.2.22. Heteroyapılı LED'in rekombinasyon olayının gösterimi Şekil.2.23. IBSG markasına ait çeşitli orta IR bölgedeki LED'lerin spektral yayılımı Şekil.2.24. Termal dedektörün şematik diyagramı Şekil.2.25. Bolometre yapısı	ŞEKII.2.20. Salail 2 21	Homooklom I ED'in hoğlantı soması və rəkəmbinəsiyər
Şekil.2.22.Heteroyapılı LED'in rekombinasyon olayının gösterimiŞekil.2.23.IBSG markasına ait çeşitli orta IR bölgedeki LED'lerin spektral yayılımıŞekil.2.24.Termal dedektörün şematik diyagramıŞekil.2.25.Bolometre yapısıŞekil.2.26.Üç bolometre malzeme tipinin direncinin sıcaklığa bağımlılığı (Rogalski, 2012)Şekil.2.27.Termoçift dedektörünün çalışma prensibiŞekil.2.28.Bir termopil sensörünün tipik çalışması (Thermopile Sensor Physics, n.d.)Şekil.2.29.Piroelektrik dedektör sisteminin yapısıŞekil.2.30.Piroelektrik dedektör sisteminin yapısıŞekil.2.31.Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısıŞekil.2.32.P- n fotodiyottaki foton soğurulması.Şekil.2.33.AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılamaŞekil.2.34.Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIPŞekil.2.35.Yarı iletkenlerde fotouyarılma.Şekil.2.36.Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak	ŞEK11.2.21.	olayının göstərimi
 Şekil.2.22. Preteroyapin LED in rekomonasyon olayının gösterimi Şekil.2.23. IBSG markasına ait çeşitli orta IR bölgedeki LED'lerin spektral yayılımı Şekil.2.24. Termal dedektörün şematik diyagramı Şekil.2.25. Bolometre yapısı Şekil.2.26. Üç bolometre malzeme tipinin direncinin sıcaklığa bağımlılığı (Rogalski, 2012) Şekil.2.27. Termoçift dedektörünün çalışma prensibi Şekil.2.28. Bir termopil sensörünün tipik çalışması (Thermopile Sensor Physics, n.d.) Şekil.2.29. Piroelektrik dedektör sisteminin yapısı Şekil.2.30. Piroelektrik dedektör sisteminin yapısı Şekil.2.31. Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı	Sekil 2 22	Hatarayanılı I ED'in rakambinasyon alayının gösterimi
 Şekil.2.23. AlGaAs/ GaAs QWIP. Şekil.2.34. Yarı iletkenlerde fotouyarılma. 	Şekii 2.22.	IBSG markasına ait çeçitli orte ID hölgədəki I ED'lərin
 Şekil.2.24. Termal dedektörün şematik diyagramı	ŞUNII.2.23.	spektral vavilmi
 Şekil.2.27. Fermal dedektorun şematik diyağıanır. Şekil.2.25. Bolometre yapısı Şekil.2.26. Üç bolometre malzeme tipinin direncinin sıcaklığa bağımlılığı (Rogalski, 2012) Şekil.2.27. Termoçift dedektörünün çalışma prensibi Şekil.2.28. Bir termopil sensörünün tipik çalışması (Thermopile Sensor Physics, n.d.) Şekil.2.29. Piroelektrik dedektör sisteminin yapısı Şekil.2.30. Piroelektrik optik sensörün tipik sinyal davranışı Şekil.2.31. Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı Şekil.2.32. P- n fotodiyottaki foton soğurulması Şekil.2.33. AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılama Şekil.2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP Şekil.2.35. Yarı iletkenlerde fotouyarılma 	Sekil 2 24	Termal dedektörün sematik divegramı
 Şekil.2.25. Bolometre yapısı. Şekil.2.26. Üç bolometre malzeme tipinin direncinin sıcaklığa bağımlılığı (Rogalski, 2012). Şekil.2.27. Termoçift dedektörünün çalışma prensibi. Şekil.2.28. Bir termopil sensörünün tipik çalışması (Thermopile Sensor Physics, n.d.). Şekil.2.29. Piroelektrik dedektör sisteminin yapısı. Şekil.2.30. Piroelektrik optik sensörün tipik sinyal davranışı. Şekil.2.31. Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı Şekil.2.32. P- n fotodiyottaki foton soğurulması. Şekil.2.33. AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılama. Şekil.2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP. Şekil.2.35. Yarı iletkenlerde fotouyarılma. Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak 	ŞUKII.2.24. Salil 2 25	Delemetre verse
 Şekil.2.20. Oç bolonletre malzenle tipinin direncinin sıcakılga bağımlılığı (Rogalski, 2012)	ŞEKII.2.23. Salail 2.26	Üla halamatra malzoma tininin dirensinin susaldise
 Şekil.2.27. Termoçift dedektörünün çalışma prensibi Şekil.2.28. Bir termopil sensörünün tipik çalışması (Thermopile Sensor Physics, n.d.) Şekil.2.29. Piroelektrik dedektör sisteminin yapısı Şekil.2.30. Piroelektrik optik sensörün tipik sinyal davranışı Şekil.2.31. Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı Şekil.2.32. P- n fotodiyottaki foton soğurulması Şekil.2.33. AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılama Şekil.2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP Şekil.2.35. Yarı iletkenlerde fotouyarılma Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak 	Şekii.2.20.	boğumlılığı (Pogelski, 2012)
 Şekil.2.27. Fermoçin dedektorunun çanşma prensiol	Sekil 2 27	Termonist dodaltärünün aaltama manailti
 Şekil.2.20. Bit termopil sensorunun tipik çanşması (Thermopile Sensor Physics, n.d.) Şekil.2.29. Piroelektrik dedektör sisteminin yapısı Şekil.2.30. Piroelektrik optik sensörün tipik sinyal davranışı Şekil.2.31. Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı Şekil.2.32. P- n fotodiyottaki foton soğurulması Şekil.2.33. AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılama Şekil.2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP Şekil.2.35. Yarı iletkenlerde fotouyarılma Şekil.2.36. Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak 	ŞEKII.2.27.	Dir termopil gengörünün tinik salamaşı (Thomasila Sanası
 Şekil.2.29. Piroelektrik dedektör sisteminin yapısı Şekil.2.30. Piroelektrik optik sensörün tipik sinyal davranışı Şekil.2.31. Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı Şekil.2.32. P- n fotodiyottaki foton soğurulması Şekil.2.33. AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılama Şekil.2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP Şekil.2.35. Yarı iletkenlerde fotouyarılma Şekil.2.36. Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak 	Şekii.2.28.	Dir termopil sensorunun upik çalışması (Thermopile Sensor
 Şekil.2.30. Piroelektrik dedektor sisteminin yapısı Şekil.2.31. Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı Şekil.2.32. P- n fotodiyottaki foton soğurulması Şekil.2.33. AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılama Şekil.2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP Şekil.2.35. Yarı iletkenlerde fotouyarılma Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak 	Salail 2 20	FILYSIUS, II.U.J.
 Şekil.2.30. Piroelektrik optik sensorun tipik sinyal davranışı	Şekii.2.29.	Piroelektrik dedektor sisteminin yapisi
 Şekil.2.31. Yogun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı Şekil.2.32. P- n fotodiyottaki foton soğurulması Şekil.2.33. AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılama Şekil.2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP Şekil.2.35. Yarı iletkenlerde fotouyarılma Şekil.2.36. Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak 	Şekii.2.30.	Piroelektrik optik sensorun tipik sinyal davranışı
yapısıŞekil.2.32.P- n fotodiyottaki foton soğurulmasıŞekil.2.33.AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılamaŞekil.2.34.Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIPŞekil.2.35.Yarı iletkenlerde fotouyarılmaŞekil.2.36.Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak	Şek11.2.31.	Y ogun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot
Şekil.2.32.P- n fotodiyottaki foton soğurulmasıŞekil.2.33.AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılamaŞekil.2.34.Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIPŞekil.2.35.Yarı iletkenlerde fotouyarılmaŞekil.2.36.Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak	G - 1-11 0 00	yapısı
Şekil.2.33.AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılamaŞekil.2.34.Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIPŞekil.2.35.Yarı iletkenlerde fotouyarılmaŞekil.2.36.Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak	Şekil.2.32.	P- n totodiyottaki toton soğurulması
Şekil.2.34.Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIPŞekil.2.35.Yarı iletkenlerde fotouyarılmaŞekil.2.36.Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak	Şek11.2.33.	AIGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılama
Şekil.2.35.Yarı iletkenlerde fotouyarılmaŞekil.2.36.Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak	Şekil.2.34.	Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP
Şekil.2.36. Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak	Şekil.2.35.	Yarı iletkenlerde fotouyarılma
· · · ·	Şekil.2.36.	Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak

	voğunluktaki değişiklik
Sekil 2.37	Varı iletkende soğurulan fotonun zamana hağlı değişimi
Sekil 2 38	Fotovoltaik etki
Sekil 2 39	Bir foton dedektörü icin spektral cevan
Şekil 2 40	Bir foton ve termal dedektör icin bağıl snektral cevan
ŞCKII.2.40.	(Rogalski 2012)
Sekil.2.41	Belirtilen sıcaklıkta calıstırıldığında cesitli dedektörlerin D*
Şenn.2.11.	değerlerinin karşılaştırılmaşı(Brenner vd. 2006)
Sekil.2.42.	Verici ve dedektörün karşı karşı va olduğu yüz yüze hücre
·····	topolojisi
Şekil.2.43.	Yüz yüze topolojisine dayanan gaz hücresi. IR kaynağı (I),
	iki farklı hücre şekli (II), mercekler (III) ve termopil
	dedektörler (IV) olarak gösterilmiştir (Sklorz vd., 2012)
Şekil.2.44.	CO2 gazı NDIR algılama sisteminin şeması
Şekil.2.45.	Düzlemsel topolojiye uygun gaz hücresinin tasarımı (a)
	metal dış kabuk; (b) metal ağ; (c) altınla doldurulmuş gaz
	hücresi; (d) çok delikli yüzey; (e) ışık kaynağı ile dedektörler
	ve (f) parçaların bir araya gelmiş hali
Şekil.2.46.	Reflektörlü gaz hücresi tasarımının şematik çizimi
Şekil.2.47.	NDIR sensörünün şematik diyagramı
Şekil.2.48.	Tam entegre IR gaz sensörünün yapısı (Jing vd., 2021)
Şekil.2.49.	(a) Merdiven şeklinde konik reflektör örneği, (b) geleneksel
	olarak konik reflektör
Şekil.2.50.	(a) geleneksel olarak konik reflektör optik boşluğu ve (b)
	merdivenle konik reflektör optik boşluğu için Light Tools
a 1 1 a 51	tarafından yapılan ışın izleme simülasyonları
Şekil.2.51.	Dönel simetrik elipsoid simülasyonu (Mayrwöger vd., 2010)
Şek11.2.52.	Dönel sımetrik elipsoid sımülasyonunun üstten görünümü
G 1 1 2 52	(Mayrwoger vd., 2010)
Şekil.2.53.	NDIR sensor gösterimi.
Şekil.2.54.	Aktif ve referans filtreye sahip NDIR sensör yapısı
Şekil.2.55.	CO2'nin sonme katsayısı spektrumu (sıcaklık = 300 K, gaz
Sala:1.2.56	basinci = 1 atm
Şekii.2.30.	$\epsilon l = 115, 50, 25, 10$ ve 4.5 için tipik fraksiyonel absorbans
Şek11.3.1.	CO2 ortaminda Termopii- Halojen ampul çiftinden oluşan
Saleil 2 2	CO2 ortemende termonil ve heleien empulden elucen entil
Şekii.3.2.	bücre tasarımı
Sekil 3 3	a) Hamamatsu T11722-01 termonil dedektörü ve h) referans
Şekii.5.5.	(filtre 1) ve CO2 (filtre 2) filtrelerinin geçirgenliği
Sekil.3.4.	I TC1050 onamnlı devrenin sematiği
Şekil 3 5	Cift heslemeli LTC1050 kuvvetlendirici devresi ve
Ģerm.5.5.	kuvvetlendirilmis sinvalin multimetre ile okunması
Sekil.3.6	Thorlabs DET10D/M InGaAs fotodedektörü
Sekil 3 7	Monokromatör ve fotodivot sistemi
Sekil 3 8	CO2 ortamında Haloien Amnul_ Termonilden oluşan çiştem
Şenii.2.0.	tasarımı
Sekil 3.9	CO2 ortamında halojen amnul ve termonilden olusan hücre
	tasarimi
Şekil.3.10.	a) Hamamatsu T11262-01 termopil b) Hamamatsu T11262-
, -	01 termopil pencere materyalinin geçirgenlik özelliği

Şekil.3.11.	Sırasıyla odaklanmış IR kaynak, optik hücre, optik kıyıcı ve	
	fotodedektör dizilimi	63
Şekil.3.12.	Optik kıyıcı kullanılarak darbeli kaynak üretimi	64
Şekil.3.13.	a) Hamamatsu P11120-201 InAsSb fotovoltayik dedektörü	
	ve b) dedektörün spektral cevabı	64
Şekil.3.14.	Sistemin genel görüntüsü	65
Şekil.3.15.	Kurulan sistemin genel görüntüsü	66
Şekil.3.16.	Referanslı ölçüm sistem tasarımı	67
Şekil.4.1.	1. ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiş olan dedektör çıkış	
	sinyalinin ve CO2 miktarının değişim grafiği	68
Şekil.4.2.	2. ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiş olan dedektör çıkış	
	sinyali ile CO2 miktarının değişim grafiği	69
Şekil.4.3.	3. ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiş olan dedektör çıkış	
	sinyali ile CO2 miktarının değişim grafiği	70
Şekil.4.4.	4. ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiş olan dedektör çıkış	
	sinyali ile CO2 miktarının değişim grafiği	71
Şekil.4.5.	5. ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiş olan dedektör çıkış	
	sinyali ile CO2 miktarının değişim grafiği	72
Şekil.4.6.	6. ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiş olan dedektör çıkış	
	sinyali ile CO2 miktarının değişim grafiği	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Çeşitli yarı iletkenler için bant aralığı ve en uzun dalga boyları	32

1. GİRİŞ

Gaz dedektörleri, bir alandaki gazların varlığını tespit eden cihazlardır. Bu tür cihazlar önemlidir çünkü insan yaşamına zarar verebilecek birçok gaz vardır. Potansiyel olarak tehlikeli alanlarda çalışan personeli korumak için tasarlanmış bu dedektörler, işyerlerindeki iş güvenliği ve sağlığı sisteminin bir parçasıdır. Sağlık ve güvenlik düzenlemeleri, bu tür cihazların madencilik, petrol ve gaz, imalat, laboratuvar araştırmaları ve tarım dahil olmak üzere çok çeşitli sektörlerde kullanılmasını şart koşmaktadır.

Güvenlik ekipmanlarının temel bir parçası olarak kullanılan gaz dedektörleri, çok sayıda yanıcı, boğucu ve zehirli gazı algılayarak tehlikeli ve potansiyel olarak ölümcül ortamlardan gelen tehditleri ortadan kaldırabilir. Yanıcı gazlara metan (CH₄), karbonmonoksit (CO) ve hidrojen (H₂); boğucu gazlara CO₂, nitrojen (N₂) ve CH₄; kanı zehirleyen, sinir sistemini tahrip eden zehirli gazlara hidrojen siyanür (HCN), CO, hidrojen sülfür (H₂S), CO₂, karbondisülfür (CS₂) örnek olarak verilebilir. En yaygın boğucu özelliği olan gaz CO₂ gazıdır. Yanma ile açığa çıkar, ortamdaki oksijeni (O₂) yok eder ve insan nefesi ile %4 oranında ortama bırakılır (Kök vd., 2020).

CO₂ kanda belli seviyelerde bulunur. CO₂ basıncı 120 mm Hg'ye varırsa; baş ağrısı, adale seğirmeleri, oryantasyon bozukluğu, bir şuur bulanıklığı, konfüzyon, hatta koma görülebilir (Wikipedia, 2017).

CO₂ tıp alanında nefes analizi yoluyla hastalıkların erken teşhisi ve teşhisine yönelik araştırmalarda, gıda sektöründe gıdaların bozulmadan saklanması ve nakledilmesinde, sanayide fazla ısınan makinelerin soğutulmasında, sera alanlarında gübreleme faaliyetlerinde, endüstri alanında metal yüzeylerin temizlenmesinde ve yangın söndürme cihazlarında yangın söndürme elemanı olarak çok çeşitli alanlarda ve uygulamalarda kullanılmaktadır.

CO₂ solunum, yanma ve organik ayrışma sırasında oluşan, saf durumda tatsız, renksiz ve kokusuz bir gazdır. Ayrıca havadan ağırdır ve boğucu özelliğe sahiptir. Havadaki O₂'ni

çok çabuk tüketebilir. Kullanıldığı alanlarda havalandırmanın çok iyi olması gerekir. Herhangi yangın veya kaçak sebebi ile zehirlenmelerin ve hatta can kayıplarının önüne geçmek için CO₂ gazının tespiti çok önemlidir.

CO₂ tipik olarak IR spektroskopik ve kimyasal reaksiyon yöntemi kullanılarak ölçülür. Kimyasal reaksiyon sensörlerinin çoğu, birden fazla gazla etkileşime girebilecekleri ve bu etkileşimden dolayı aşınabilecekleri için güvenilir değildir. IR sensörlerinin gazla teması yoktur, bu da onları daha güvenilir kılar ve diğer gazlardan etkilenmemeleri için belirli gazlar için üretilmiştir. Kimyasal sensörlerle karşılaştırıldığında, IR sensörünün kullanım ömrü daha uzundur ve yüksek doğruluk ve hızlı yanıt süresi sağlar. IR sensörleri, CO₂ gazını tespit etmek için en güvenilir yöntemdir. Bu çalışmada, IR yöntemi kullanılarak çeşitli dedektör ve kaynak kombinasyonları ile ortamdaki CO₂ gazının tespit edilmesi hedeflenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Gaz Algılama

Hızlı nüfus artışı, araçlar ve endüstriyel faaliyetler, atmosfere salınan ve doğal çevre koşullarını kötüleştiren başlıca emisyon kaynaklarıdır. Bu emisyonların sürekli olarak takip edilmesi, hem çevresel bozulmayı önlemek hem de insan ve diğer canlıların yaşamı için çok önemlidir. Bu takibi gaz sensörleri ile yapmak mümkündür. Gaz sensörleri, atmosferdeki gazların varlığını veya yoğunluğunu algılamanın yanı sıra O₂ seviyesinin azalmasını da algılayan sistemlerdir (Salehabadi vd., 2023). Yalnızca atmosferin değil tarımsal altyapılarda, su arıtma tesislerinde ve endüstriyel tesislerde hem prosesleri izlemek hem de çalışanların güvenliğini sağlamak için kullanılırlar. Bu sensörler, ortamdaki gaz miktarını ve gaz bileşiminin doğasını elektrik sinyalleriyle ortaya koyar ve değişimini sağlar (Erduran vd., 2022).

2.2. Gaz Sensör Çeşitleri

Gazları izlemek için çeşitli gaz sensörleri mevcuttur. Ölçülecek gaza ve uygulama yöntemlerine göre en uygun gaz tespit yöntemini seçmek mühimdir. Farklı algılama yöntemlerine dayanan ve en yaygın kullanılan sensör türleri şunlardır: katalitik boncuk, elektrokimyasal, yarıiletken ve optik sensörler (Hodgkinson & Tatam, 2012). Gaz sensörünün algılama prensibine bağlı olarak algılanacak gaz farklılık gösterir. Ayrıca sensörlerin performans açısından avantaj ve dezavantajları vardır.

2.2.1. Katalitik Boncuk Gaz Sensörleri

Katalitik gaz sensörleri diğer bir adıyla pelistörler yanıcı- patlayıcı gazları algılamak için kullanılır. Bu sensörler karşılıklı kollarda elektrikle ısıtılan bir aktif katalitik boncuk ve bir referans boncuk bulunan bir Wheatstone köprüsünden oluşur (Krebs & Grisel, 1993). Şekil 2.1'de katalitik boncuk gaz sensörünün yapısı gösterilmiştir. Ölçülecek gaz molekülleri aktif boncuk üzerinde oksitlenir, bu durum sonucunda boncuğun içinde bobin şeklinde sarılmış platinyum tel ısınır ve direnci artar. Dirençteki değişiklik sensörden sinyal olarak algılanır ve ortamdaki gaz tespit edilir.

Katalitik boncuk sensörleri sağlamdır, ancak çalışmak için O_2 'ye ihtiyaç duyarlar (Briano, 2019). Ortamda yanıcı bir gazın fazla bulunması ölçüm sonuçlarını olumsuz etkileyecektir. Bu da yüksek yoğunluklarda sürekli ölçüm yapılmasına engel olur.

Katalitik sensörler sürüklenme sorunu yaşarlar ve belirli bileşikler tarafından bozulabilirler. Bu bileşiklerin ortamda bulunması ya da sensöre bulaşması sonuçların yanlış çıkmasına sebep olur. Ayrıca bu sensörler ölçüm yaptığı gazın molekül büyüklüğünden etkilenir, bir molekül ne kadar büyükse tepki süresi de o kadar yavaşlar (Karf & Scoot, 2022).



Şekil 2.1. Katalitik sensör yapısı.

2.2.2. Elektrokimyasal Gaz Sensörleri

Elektrokimyasal gaz sensörleri, tespit edilmek istenen gazı bir elektrotta oksitleyerek ya da indirgeyerek sensörde oluşan elektrik akımını ölçerek hedef gazın yoğunluğunu tespit eden gaz dedektörleridir. Elektrokimyasal gaz sensörleri, bir elektrolit ile temas halinde olan iki, üç ya da dört elektrot içerir (bkz. Şekil 2.2). Çalışma elektrodu diğer bir adıyla algılama elektrodu, çoğunlukla gözenekli bir zar yoluyla izlenmek üzere hem ortam havasıyla hem de elektrolitle temas eder (Warburton vd., 1998).

Çalışma elektrodu, ölçülecek toksik gazın oksidasyonunun (CO, azot monoksit (NO), H₂S, kükürt dioksit (SO₂)) ya da indirgenmesinin (klor (Cl₂,) azot dioksit (NO₂)) gerçekleştiği yerdir. Karşı elektrotun görevi, çalışan elektrotun reaksiyonunu dengelemektir. Eğer çalışan elektrot hedef gazı okside ederse, karşı elektrot eşdeğer bir elektrik akımı oluşturmak için başka bir molekülü indirgemelidir. Örneğin, çalışan elektrotta CO oksitlenirse, karşı elektrotta O₂ indirgenir. Referans elektrot, sensörün her zaman doğru bir şekilde çalışmasını sağlamak için çalışan elektrot potansiyelini sabit tutar (Dong vd., 2017). Çalışma elektrodu ile karşı elektrod arasındaki akım ölçülerek hedef gazın konsantrasyonu bulunabilir.

Elektrokimyasal sensörler tipik olarak küçük, ucuz, hassas ve nispeten spesifik olabilir, ancak neme karşı çapraz duyarlılıktan etkilenirler ve kısa ömürleri vardır(Briano, 2019).



Şekil 2.2. Elektrokimyasal sensör yapısı

2.2.3. Yarıiletken Gaz Sensörleri

Yarıiletken oksitler metal oksitler olarak da bilinir ve en yaygın kullanılan algılama malzemeleridir (Neri, 2015). Farklı oksit malzemeleri de kullanılmaktadır. Metal oksit sensörler (MOS), analit gazının ana malzeme tarafından soğurulmasına dayanır (Briano, 2019). MOS gaz sensörleri neredeyse tüm indirgeyici ve oksitleyici gazlara tepki verir ((CO), nitrik oksitler (NO_x), amonyak (NH₃), sülfürlü gazlar (H₂S, SO₂), hidro karbonlar (C_xH_y)) Aynı zamanda uçucu organik bileşikler (VOC'ler) gibi karmaşık aromaların analizinde de kullanılabilir. Uygun bir kimyasal kaplama sayesinde yüksek seviyede seçicilik elde edilir.

Yarı iletken, havada yüksek sıcaklıkta ısıtıldığında serbest elektronları yakalayarak parçacık yüzeyinde O₂ soğurulur. Malzemeye ve hedef gaza bağlı olarak sensörün içsel iletkenliğini sağlamak için 300 °C ile 900 °C arasındaki çalışma sıcaklıkları gereklidir. Soğurulan O₂ konsantrasyonundaki değişimin bir sonucu olarak yarıiletken malzemenin direnci değişir. Yarı iletken tarafından soğurulan O₂, hedef gaz ile ile temas ettiğinde tüketilir ve sonuç olarak direnç düşüşü ortaya çıkar. Sensör, hedef gazın yokluğunda orijinal direnç seviyesini geri kazanır. Direnç değişikliği, gaz konsantrasyonuyla ilişkilidir ve gazın türü, yarı iletken direnç değişikliği ölçülerek bulunabilir.

Yarıiletken gaz sensörlerinin avantajları arasında kolay imalat, düşük maliyet, kullanım kolaylığı ve farklı gazları algılama yeteneği yer alır. Bu algılama malzemelerinin dezavantajları arasında yüksek güç tüketimi, zayıf seçicilik ve çapraz seçicilik, düşük gaz yoğunluklarına karşı düşük hassasiyet, temel direnç kayması ve yüksek çalışma sıcaklığı sayılabilir (Mirzaei vd., 2016).



Şekil 2.3. Yarı iletken sensör yapısı.

2.2.4. Optik Gaz Sensörleri

Birçok kimyasal tür, ultraviyole (UV), görünür, yakın IR ve orta IR spektral aralıklarda belirli dalga boylarındaki ışığı emer. Soğurma çizgileri veya bantları her türe özgüdür ve bu, tespit ve ölçümlerin temelini oluşturur (Hodgkinson & Tatam, 2012). Bu sensörler birer ışık kaynağı, ışık algılayıcı dedektör ve optik hücreden oluşurlar (bkz Şekil 2.4). Işık kaynağından yayılan ışınlar optik hücredeki gaz molekülleri tarafından soğurulur. Böylece hücre içindeki ışık zayıflatılmış olur. Zayıflayan ışık dedektöre ulaşır ve zayıflamadaki değişime bağlı olarak gaz yoğunluğu hesaplanır.

Optik gaz sensörleri gerçek zamanlı yanıt sağlar ve tespit edilmek istenen gaz türünü etkilemezler. Aynı şekilde gaz, sensörü oluşturan malzemelerle etkileşime girmediği için sensörleri etkilemez. Optik gaz sensörlerinin soğurma özelliği belirli bir dalga boyunda ölçmesi, zaman içinde minimum sapma sağlar. Ve en önemlisi, optik gaz sensörleri son derece spesifiktir çünkü tıpkı parmak izi gibi her gazın kendine has soğurma spektrumu vardır (Briano, 2019).



Şekil 2.4. Optik gaz algılama sistemi.

2.3 CO2 Gazı İçin Uygun Yöntemin Belirlenmesi

Yarıiletken yöntem bir metal oksit yüzey üzerine, ölçülmesi istenen gazın soğurulmasını gerektirdiğinden CO₂ gibi kimyasal olarak kararlı gaz moleküllerini algılamak için pek uygun bir yöntem değildir. Yarıiletken sensörler genelde ya çok yüksek ya da çok düşük CO₂ yoğunlukları bulunan ortamlarda kullanılır. Sıcaklık ve nemden kolay etkilenir.

Katalitik yöntemde ise seçilebilir gazların aralığı küçüktür. Sensör zehirlenmeye karşı hassastır ve çoğu organik buharın sensör üzerinde zehirlenme etkisi vardır. Katalitik boncuk sensörlerinin periyodik olarak değiştirilmesi gerekir. Katalitik boncuk teknolojisinin diğer bir yaygın dezavantajı ise yüksek gaz konsantrasyonlarından kaynaklanan aşırı doygunluktur. Aşırı doygunluğun potansiyel bir sonucu O₂'nin yer değiştirmesidir, bu da sensörün çıkış sinyalinin azalmasına neden olur. Böylece zenginleştirilmiş bir gaz ortamına sahip olunduğunda gaz seviyelerinin düştüğü algısını yaratır.

Elektrokimyasal yöntem tipik CO₂ ölçüm yöntemlerinden biridir fakat sürüklenme ve doğru ölçümün diğer gazlar tarafından kolayca bozulması bu yöntemi dezavantajlı hale getirir. Elektrokimyasal sensörler kısa ömürlüdür ve düzenli bakım gerektirmektedir.

Buraya kadar bahsedilen tüm bu yöntemlerle üretilen sensörlerin ortak bir özelliği vardır. Sensör malzemesi, tespit edilmek istenen gazla kimyasal reaksiyona girerek sensörün kendisini etkin bir şekilde değiştirir. Böylece sensörde sık kalibrasyon ihtiyacı, bozulma, sürüklenme ve sınırlı kullanım ömrü gibi sorunlara yol açar. Ayrıca, bu sensörler tepki hızını sınırlayarak difüzyon yoluyla aktif alana veya hacme ulaşmak için gaza güvenir. Hız ise genellikle yanıtı daha da yavaşlatan gözenekli zarlar ve filtreler kullanılarak elde edilen özgüllükle takas edilir. Bu yöntemlerle karşılaştırıldığında optik algılama minimum sapma, yüksek gaz özgüllüğü, hızlı yanıt ve uzun ömür sağlar (Briano, 2019).Ölçümler proses kontrolünde, önemli olabilecek gaz numunesini bozmadan yerinde ve gerçek zamanlı yapılabilir (Lackner, 2007).

Optik yöntemi, bir molekülün fiziksel özelliklerinin (belirli bir dalga boyunda soğurulması gibi) doğrudan bir ölçümünü yaptığı için, sürüklenme azalır ve gelen ışık yoğunluğu belirlenebildiği için, ölçümler kendinden referanslıdır ve bu da onları doğası gereği güvenilir kılar. Bu şekilde, optik gaz algılama, düşük performanslı sensörler ile üst düzey laboratuvar ekipmanı arasındaki önemli bir boşluğu doldurur (Hodgkinson & Tatam, 2012).

2.4. IR Spektroskopi

IR spektroskopi diğer bir adıyla titreşim spektroskopisi, IR radyasyonun madde ile soğurma, emisyon veya yansıma yoluyla etkileşiminin ölçümüdür. Katı, sıvı veya gaz halindeki kimyasal maddeleri veya fonksiyonel grupları incelemek ve tanımlamak için kullanılır. Yeni malzemeleri karakterize etmek veya bilinen ve bilinmeyen numuneleri tanımlayıp doğrulamak için kullanılabilir.

2.4.1. IR Spektroskopi Tarihçesi

Sir Isaac Newton (1643–1727) mercekler, prizmalar, teleskoplar, mikroskoplar ve optik (ayna/lens) cilalama teknolojilerini toplayarak optik biliminin gelişmesine büyük katkıda bulunmuştur. 1668'de renk sapması olmayan, yansıtıcı bir teleskop üretti. 1670 yıllarında, ışığın bir renk spektrumundan (gökkuşağı) oluştuğunu belirledi. 1672'de sunduğu bir makalesinde, Aristoteles'in önerdiği "saf beyaz (güneş ışığı)" yerine ışığın, farklı

kırılmalara sahip çeşitli renklerin bir karışımı olduğunu ilan ettiği "Yeni Işık ve Renk Teorisi" ni duyurdu ve teorisini ünlü prizma deneyinde kanıtladı (Toyoda & Ohtake, n.d.).

1800 yılında, Uranüs gezegeninin keşfi ile ünlü olan Sir Frederick William Herschel (1738-1822) adlı Alman gökbilimci, Güneş'i gözlemlerken elektromanyetik spektrumun IR bölge olarak bilinen kısmını keşfetti. Herschel, teleskoplarını oluştururken Güneş'i gözlemlemesine yardımcı olabilecek farklı renkli filtreler denemeye başladı. Güneş'in parıltısını azaltmak için kırmızı bir filtre kullanırken, ısı oluştuğunu fark etti ve bu ışınları 'kalorifik ışınlar' olarak kabul etti. Bu ışınlar daha sonra IR olarak yeniden adlandırıldı (Sarola, n.d.).

1881'de Abney ve Festing tarafından ilk yakın IR spektrumlar fotoğraf plakaları kullanılarak ölçüldü. Sadece ilk spektrumu oluşturmakla kalmadılar, aynı zamanda soğurma özelliklerini araştırdıkları sıvıların kimyasal bileşimi ile ilgili olduğunu da öne sürdüler (Davies, n.d.).

William W. Coblentz IR spektroskopisinin en önemli öncüsü idi. 1905'te spektrumlarını 1000 nm'den 16.000 nm'ye kadar kaydettiği bileşiklerle ilgili geniş bir çalışmanın sonucunu yayınladı. Coblentz'in çalışması, araştırmacıların moleküller içindeki atom gruplarının karakterini orta IR'deki (2500-50.000 nm) spesifik soğurmalarla ilişkilendirebilmeleri açısından bir atılımdı. Bu soğurulmalar, grupların atomlarıyla ilişkili kimyasal bağların temel titreşimleriyle etkileşimlerin sonucudur (Davies, n.d.).



Şekil 2.5. William W. Coblentz (Wikipedia contributors, 2022).

2.4.2 IR Soğurma Spektroskopisinin Temelleri

Radyasyon yoğunluğunun dalga boyunun bir fonksiyonu olarak ölçülmesi spektroskopi olarak ifade edilir. IR spektroskopisi, IR ışığın geçirgenliğine, soğurulmasına veya yansımasına dayanan bir titreşim spektroskopisi sınıfıdır ve elektromanyetik spektrumun IR bölgesinde ışığın bir molekül tarafından soğurulmasını tespit eden bir optik algılama tekniğidir. Orta (MIR) ve yakın IR (NIR) aralıkta titreşim spektroskopisi hemen hemen her organik bileşik hakkında yapısal bilgi sağlar. NIR spektroskopisi hızlıdır, invaziv olmayandır, çok parametrelidir, sağlamdır ve bir prosesle arayüz oluşturması kolaydır böylece ölçüm sistemi gereksinimlerini mükemmel bir şekilde karşılar (Reich, 2016). Işığı soğurmak için bir molekülün yapısında dipol momenti olarak adlandırılan yapıyı sergileyebilen bir bağ bulunmalıdır ve bu bağ içindeki elektronların eşit şekilde paylaşılmadığı anlamına gelir. Çevrede tespit edilmek veya izlenmek istenen birçok gaz IR aktiftir ve bu gazlar elektromanyetik spektrumun IR bölgesinde tipik olarak 2 ila 15 µm arasında soğurma çizgileri bantları sergiler (bkz. Şekil 2.6). Bu soğurma özelliği, bir gazın varlığını tespit etmek ve yoğunluğunu ölçmek için birer araçtır (Brenner vd., 2006).



Şekil 2.6. Gazların soğurma spektrumları.

Atomlar ve moleküller ışığı elektronik geçişler veya moleküler titreşim, dönüş ve öteleme yoluyla emer. Katı maddelerde sadece titreşim hareketi söz konusudur. Sıvılarda her üç hareket de mümkündür fakat ötelenme ve dönme biraz sınırlıdır. Gazlarda ise her üç hareket de gerçekleşir. Ötelenme ve dönme hareketlerinin enerji seviyeleri molekülün büyüklüğüne bağlıdır, ancak titreşim hareketinin enerji seviyesi bağdaki atomların büyüklüğüne ve bağın kuvvetine bağlı olarak değişir. Titreşim enerjisi seviyesi ötelenme ve dönme hareketlerinin enerji seviyesi ötelenme te dönme hareketlerinin enerji seviyesi ötelenme te dönme hareketlerinin enerji seviyesi ötelenme te dönme hareketlerinin enerji seviyesi ötelenme te dönme hareketlerinin enerji seviyesi ötelenme te dönme hareketlerinin enerji seviyesindedir. Bu hareketlerin enerji olarak karşılığı IR ışınlarının enerji seviyesindedir (Malzeme Analiz Yöntemleri: 6. Hafta Titreşim Spektroskopisi, t.y.).

IR ışınlar 3 sınıfa ayrılabilir. Bunlar NIR, MIR ve uzak IR (FIR) bölge olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.7'de IR spektrum bölge dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Elektromanyetik spektrum içindeki IR bölgeler.

Pek çok inorganik ve organik molekülde bulunan kimyasal bağlarda atomlar arasındaki titreşim enerjileri yaklaşık olarak MIR bölgesindedir. Dönme ve ötelenme enerjilerinin seviyesi molekülün büyüklüğüne yani kütlesine bağlıdır. Bu enerjilerin seviyesi FIR bölgesindedir (Malzeme Analiz Yöntemleri: 6. Hafta Titreşim Spektroskopisi, t.y.).

Bir molekülde iki atom arasında kurulmuş olan bağda tek bir tip titreşim hareketi olmaz. Titreşim hareketi atomları birleştiren bağ boyunca olabilir. Ayrıca molekülün formuna bağlı olarak birkaç şekilde de olabilir. Bu titreşim hareketleri şu şekildedir:

 Şekil 2.8'de gösterilen esneme titreşimi, iki atomu birleştiren bağın ekseni doğrultusunda atomların birbirlerine karşı yaptığı yaklaşma ve uzaklaşma hareketidir.



Şekil 2.8. Esneme titreşimi.

 Şekil 2.9'da gösterilen eğilme titreşimi, atomlardan birinin başka atomlara bağlı olduğu durumdaki atomlarla oluşturduğu düzleme göre bağlı olan sallanma hareketidir.



Şekil 2.9. a) Düzlem dışı ve b) düzlem içi eğilme titreşimleri.

• Şekil 2.10'da gösterilen makaslama titreşimi, en az üç atom arasında oluşan ve atomlar arasındaki açının değişmesine neden olan titreşim hareketidir.



Şekil 2.10. Makaslama titreşimi.

• Şekil 2.11'de gösterilen burulma titreşimlerinde atomların, atomları birleştiren tekli ağ etrafında burulma hareketi yapmasıdır.



Şekil 2.11. Burulma titreşimi.

2.4.1. CO2 Moleküler Titreşimi

Bir molekülün N atomu varsa, her atomun konumu x, y ve z koordinatlarıyla belirlenir. Molekül 3N serbestlik derecesine (DOF) sahiptir. 3N DOF, molekülün atomları arasındaki bağ mesafelerini ve açılarını belirler. Molekülün kendisi uzayda üç yönde hareket edebilir ve üç eksen etrafında dönebilir (Gerlach vd., 2019). Moleküllerdeki titreşim sayısı molekül eğer çizgisel ise 3N - 5, açılı ise 3N - 6 tanedir. Her DOF, olası bir temel salınıma karşılık gelir.

 CO_2 çizgisel bir moleküldür ve toplam $(3 \times 3) - 5 = 4$ tane titreşim hareketi vardır. Bu hareketler:

- Simetrik esneme
- Asimetrik esneme
- Makaslama
- Burulma

Şekil 2.12'de CO₂'nin temel salınımları gösterilmektedir.

Moleküler Tip	Molekül		Dalga Sayısı ữ (cm-¹)	IR aktif
Lineer molekül	Karbondioksit (CO ₂)	← ← ← ← ● Simetrik gerilim	1334	Hayır
DOF = 3N - 5	©	Asimetrik gerilim	2283	Evet
	N = 3 DOF = 4		649	Evet
		Makašlama ⊗ O —_CO⊗	649	Evet
		Makaslama (çizim düzlemine dik)		

Şekil 2.12. CO₂'nin temel salınımları.

IR spektroskopisinde gözlenen soğurma çizgileri molekülde dipol momentini değiştiren titreşimlerin enerji seviyelerinin değiştiği soğurmalardır. Bundan dolayı dipol momentinin değişmediği simetrik titreşim hareketleri bu spektroskopide bir soğurma bandı vermez. Şekil 2.13'de CO₂'nin soğurma spektrum çizgileri gösterilmektedir.



Şekil 2.13. CO₂ soğurma bantları.

2.5. IR Gaz Sensör Sistemi için Kaynak Türleri

IR kaynak, IR gaz algılama sisteminin temel ve çok önemli bir gereksinimidir. İyi bir kaynağın temel gereksinimleri şunlardır; gereken dalga boyu aralığında IR ışınları yayma yeteneği, yayılan IR ışığının gaz hücresinde sönmeden dedektör ucuna ulaşma gücü ve yüksek hassasiyetli kilitlenme tespiti için iyi bir hızda modülasyon kapasitesi, dış ortam koşullarına karşı stabilite ve direnç, kısa ve uzun vadeli sürüklenme. IR kaynaklar termal ve yarı iletken olmak üzere iki türe ayrılmaktadır. Genel olarak lamba, ışık saçan diyot (LED) ve mikro elektro mekanik sistem (MEMS) ısıtıcı IR nesil için üç çeşit kaynaktır (Jha, 2022).

2.5.1. Termal IR Kaynaklar

IR kaynaklar, ısıtılan bir parçadan termal radyasyon yayan cihazlardır. Bunlardan bazıları akkor lambaların özel formlarıdır. Bir lambadaki filamana akım verildiğinde Joule 1sısı üretilir, böylece filaman ısıtılır ve yüksek sıcaklık nedeniyle ışık yayar. Şekil 2.14'de bir lambayı aydınlatmak için kullanılan mekanizma gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Lambanın elektriksel bağlantı şeması.

Nernst Lambası

Tarihsel olarak NIR için en iyi bilinen kaynak Nernst lambasıydı (bkz. Şekil 2.15). Bu, içerisinden bir elektrik iletkeni tarafından ısıtılan, herhangi bir penceresi olmayan ve yaklaşık 1000 °C'de çalışan, seramik malzemeden yapılmış bir çubuktu. Bu, spektrometrelerin yarık geometrisi için çok uygundu fakat basit gaz dedektörleri için fazla spesifikti (Brenner vd., 2006).



Şekil 2.15. Nernst Lambası (Nernst Lamp / Science Museum Group Collection, n.d.).

Globar

Globar, IR spektroskopi için termal ışık kaynağı olarak kullanılmaktadır. Globar'ın yapımında tercih edilen malzeme, çeşitli boyutlarda çubuklar veya kemerler şeklinde olan silisyum karbürdür (SiC). Şekil 2.16'da SiC globar gösterilmekedir.



Şekil 2.16. SiC Globar.

Globar, elektrik akımı sağlayan bir devreye yerleştirildiğinde, 2 ila 50 µm dalga boyunda radyasyon yayar. Globarlar spektroskopi için IR kaynaklar olarak kullanılır çünkü spektral davranışları yaklaşık olarak Planck radyatörüne (kara cisim) karşılık gelir. Şekil 2.17'de kara cisim ve globar spektral güç dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Kara cisim ve Globar spektral güç dağılımı (Mesa, t.y.).

Nernst ve Globar IR kaynakları birçok yönden (sıcaklık aralığı ve işlevsellik gibi) birbirlerine benzemektedir. Ancak Nernst lambasının yakın IR bölge, Globar'ın ise daha uzun IR bölge için kullanılması uygundur.

Tungsten Halojen Lamba

Günümüzde ise filament yapımında yaygın olarak kullanılan tungsten ısıtıldığında, 2000 °C ila 3000 °C kadar yüksek sıcaklıklara ulaşabilir. Filamentler aşırı derecede ısındığı için ampulün içi, filamentlerin oksitlenmesini veya buharlaşmasını önlemek için nadir bir gaz veya halojen gazıyla doldurulur (*Gas Sensors Types and Mechanism / Tutorials / CO2 Sensors / Products / Asahi Kasei Microdevices (AKM)*, n.d.). Şekil 2.18'de tungstenhalojen lambanın sıcaklığına bağlı spektral sağılımı gösterilmektedir.



Şekil 2.18. Tungsten- Halojen lambanın sıcaklığına bağlı spektral dağılımı.

Lamba, çok yaygın olarak kullanılan bir IR ışık kaynağıdır ve aynı zamanda gaz sensörleri için de iyi bir ışık kaynağı olabilir. Gazlar, türlerine bağlı olarak IR ışınlarının doğal bir soğurulma özelliğine sahiptir. Bir lamba görünür bölgeden IR bölgeye kadar çeşitli dalga boylarında ışığı aynı anda yayabildiğinden, tek bir lamba çeşitli gaz türlerini barındırabilir. Oldukça sınırlı parlaklığın kabul edilebilir olduğu spektroskopi uygulamalarında geniş bantlı IR ışık kaynakları olarak kullanılabilir. Emisyonları yaklaşık olarak sabit olabilir ancak kalibrasyonun yüksek hassasiyette olması şart değildir.

Termal IR kaynak, sıcaklığın yükselmesi ve ışık yayması için zamana ihtiyaç duyduğundan buna bağlı olarak voltaj uygulama süresi artar. Bu durum da daha fazla güç tüketimine neden olur. Ayrıca filamanın titreşimlere karşı hassas olması sebebiyle, bir gaz sensörünün IR kaynağı olarak bir lamba kullanıldığında, monte edilen gaz sensörünün çevre ortamında dikkatli olmak gerekir (*Gas Sensors Types and Mechanism | Tutorials | CO2 Sensors | Products | Asahi Kasei Microdevices (AKM)*, n.d.).

Bir lamba çift yarım dalga filtrelerine kadar uzanan IR girişim filtreleriyle birleştirildiğinde, IR gaz tespiti için uygun dalga boyu seçilmiş radyasyonun
sağlanmasına yönelik popüler bir güncel yöntem vardır. Ancak bu lamba kaynakları cam zarfın kesilmesi nedeniyle 5 µm dalga boyunun daha azıyla sınırlıdır. Şekil 2.19'da gösterildiği gibi radyasyonun dalga boyu dağılımı, tungsten lambanın görünür noktasına yakın tepe noktasına ulaşan Planck dağılım yasasına uyar ve sağlanan gücün yalnızca küçük bir kısmının kullanılmasına neden olur (Brenner vd., 2006).



Şekil 2.19. 8 Hz'de modüle edilmiş iki termal kaynak, 1 mm² alana sahip bir vakumda 2300 K'de bir tungsten tipi filaman ve 4 mm² alana sahip 800 K'de gri cisim kaynağı (Crowder, 2006).

Lamba kaynakları, basitlikleri, düşük maliyetleri ve yüksek spektral emisyon (% 4 bant genişliğinde 2 mW/steradyan) nedeniyle geleneksel olarak dağıtıcı olmayan IR (NDIR) gaz sensörlerinde ilk tercihtir. Filament bazlı bir lambanın IR emisyonunu, yoldaki birden fazla yansıma nedeniyle zayıflaması nedeniyle dedektöre yönlendirmek zor olmasına rağmen, NDIR sensörlerinde hala kullanılmaktadırlar (Jha, 2022).

MEMS

Diğer bir termal ışık kaynağı ise MEMS'dir. Işık yayma prensibi lambalar ile aynıdır. Bir MEMS ısıtıcısı, yarı iletken bir işlemle işlenen dirençli bir ısıtma elemanının ince bir filmine elektrik akımı sağlandığında ısı üretir ve ışık yayar. MEMS kaynağı, filamentin yüksek sıcaklığa ısıtılmasının önemi nedeniyle, ısının kaçmasını önlemek için geriye katlamalı ve spiral desenli olarak son derece küçük bir filaman ve dar bir ısı iletim yolu uygulanması dikkate alınarak tasarlanmıştır. Isı üretimini kolaylaştırmak için özellikle küçük bir ısı kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece yanıt hızı bir lambadan daha hızlı ve LED'den daha yavaş olur. Ayrıca MEMS, bir lamba kadar ısınmadığından emisyon dalga boyu bandı bir lambanınkinden daha dar, fakat bir LED'inkinden daha geniş olur. MEMS ısıtıcı mikro yapıya sahip olduğundan lambada olduğu gibi titreşimlere karşı hassaslık dezavantajına sahiptir. Ayrıca, sıcak kısım açıkta olduğundan, MEMS ısıtıcısı, IR kaynak olarak yanıcı gazların ölçümü için uygun değildir. (*Gas Sensors Types and Mechanism / Tutorials / CO2 Sensors / Products / Asahi Kasei Microdevices (AKM)*, n.d.). Şekil 2.20'de MEMS'in yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.20. MEMS tabanlı mikro ısıtıcı yapısı.

2.5.2. Yarıiletken IR Kaynaklar

Günümüzde yüksek hacimli gaz tespit uygulamaları için en olası yarıiletken kaynaklar IR LED'lerdir. Çalışma hızı, daha iyi sinyal-gürültü oranı, daha az stabilizasyon sorunu, geliştirilmiş doğruluk, güvenlik ve dalga boyu aralığının 4,5 µm'deki cam kesme noktasının ötesine uzatılması gibi özellikler dağılmayan kızılötesi (NDIR) gaz sensörlerindeki IR kaynak olarak LED'lerin kullanılmasını sağladı (Jha, 2022).

Bir LED'e ileri voltaj uygulandığında azınlık elektronları P ekleminden N eklemine gönderilirken, azınlık delikleri N ekleminden P eklemine gönderilir (bkz. Şekil 2.21). Eklem sınırında azınlık taşıyıcılarının konsantrasyonu artar ve eklemdeki fazla azınlık taşıyıcıları, çoğunluk yük taşıyıcılarıyla yeniden birleşerek rekombinasyona neden olur. Bu olay meydana geldiğinde ise enerji, fotonlar halinde salınır yani maddeye özgü dalga boyunda ışık saçar. Bu olaya elektrolüminesans denmektedir. Elektrolüminesans, bir malzemenin içinden geçen elektrik akımına yanıt olarak ışık yaydığı optik ve elektriksel bir olgudur. İleri voltaj arttıkça ışığın şiddeti de artar ve maksimuma ulaşır (Admin, 2022). Beyaz, kırmızı ve mavi LED'ler gibi insan gözünün görünür bölgesindeki LED'ler günlük yaşam boyunca kullanılmaktadır. Ancak birçok gaz molekülünün görünür bölge yerine kızılötesi bölgede soğurma dalga boylarına sahip olması nedeniyle NDIR tipi gaz sensörlerine uygun kızılötesi ışık yayan LED'lere ihtiyaç duyulmaktadır (*Gas Sensors Types and Mechanism | Tutorials | CO2 Sensors | Products | Asahi Kasei Microdevices (AKM)*, n.d.).

Aynı malzeme olan iki farklı katkılı yarı iletken kullanılarak gerçekleştirilen LED'lere homoeklem adı verilir. Farklı bant aralıklı malzemeler kullanılarak gerçekleştirildiklerinde ise bunlara heteroyapılı adı verilir. Heteroyapılı LED, homoeklem LED'den daha parlaktır. Şekil 2.21'de homoeklem LED'in bağlantı şeması ve rekombinasyon olayı gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Homoeklem LED'in bağlantı şeması ve rekombinasyon olayının gösterimi.

Şekil 2.22'de ise heteroyapılı LED'in rekombinasyon olayı gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Heteroyapılı LED'in rekombinasyon olayının gösterimi.

Şekil 2.23'de IBSG markasına ait çeşitli orta IR bölgedeki LED'lerin spektral yayılımı gösterilmektedir. Bu LEDler yaydıkları ışığın dalga boyları sebebiyle gaz algılama sensörlerinde tercih edilmektedir.



Şekil 2.23. IBSG markasına ait çeşitli orta IR bölgedeki LED'lerin spektral yayılımı.

LED'ler, NDIR tipi gaz sensörleri için IR kaynak olarak üstündür. Termal tip ışık kaynaklarıyla karşılaştırıldığında LED'ler çok daha hızlı tepki verir ve ışık yayma süresini sınırsız olarak azaltır, böylece gaz sensörünün güç tüketimini azaltır. LED'ler akımı doğrudan ışığa dönüştürdükleri için LED'lerin kendisi ısınmaz bu da onları, yanıcı ve soğutucu gaz gibi bir gaz sensörü ışık kaynağı olarak kullanım için uygun bir çözüm

haline getirir (*Gas Sensors Types and Mechanism | Tutorials | CO2 Sensors | Products | Asahi Kasei Microdevices (AKM)*, n.d.).

Yarıiletken kaynakların dezavantajlarından biri, genel olarak emisyonlarının büyük oranda sıcaklığa bağlı olmasıdır, çünkü enerji aralığı oda sıcaklığında kT'ye yakın olan bir yarı iletken doğası gereği sıcaklığa duyarlıdır. Uygulamasında ise bu, ya sıcaklık dengelemesi gerektirir ya da LED'in sabit bir sıcaklıkta tutulması gerekir. İkinci dezavantajı ise termal kaynaklara göre önemli ölçüde daha maliyetli olmalarıdır. Üçüncüsü ise, 4 µm dalga boyunda yaklaşık 1 mW olan ve 10 µm'de onlarca µW'ye düşen toplam çıkış gücü, termal kaynakların yaydığı güçten daha küçüktür. Bunlarla birlikte, bir avantaj, yarıiletken kaynakların yüksek frekanslarda modüle edilebilmesidir, ancak bu özellikten yararlanmak için doğal olarak hızlı bir dedektör gerektirir (Brenner vd., 2006).

2,5 – 15 μm dalga boyu bölgesinde lazer ve optik parametrik osilatörün (OPO) kullanılması maliyet açısından bir engeldir. Bununla birlikte, ticari kuantum kademeli (QC) lazerlerin ortaya çıkışı, orta IR'de pratik sistemler için olanak sağlamaktadır (Brenner vd., 2006)

2.6. IR Gaz Sensör Sistemi için Dedektör Türleri

IR dedektörler IR ışığa yönelik dedektörlerdir. Bunlardan bazıları nispeten uzun bir dalga boyu bölgesinde hassas olan fotodedektörleridir (foton dedektörleri) ve ışığı akıma dönüştürmek için yarı iletkenin fotovoltaik gücünü kullanırlar. Termal dedektörler ise IR ışığın soğurulması ile indüklenen küçük sıcaklık farkının neden olduğu voltajı veya polarizasyonu tespit eden bir yöntem ile algılamaya dayanmaktadırlar.

2.6.1. Termal Dedektörler

Termal dedektörler yük taşıyıcılarının doğrudan uyarılmasıyla fotonları tespit etmezler. Bunun yerine fotonları emerler ve enerjilerini ısıya dönüştürürler; bu da çok hassas bir termometre tarafından tespit edilir. Fotonların biriktirdiği enerji bu süreç için önemlidir; dalga boyu önemsizdir, yani dedektör, sinyaldeki foton sayısı soğurulan enerjiyi aynı tutacak şekilde ayarlandığı sürece herhangi bir dalga boyundaki sinyallere aynı şekilde yanıt verir. Bu nedenle duyarlılığın dalga boyu bağımlılığı düzdür ve foton soğuran malzemenin izin verdiği ölçüde geniştir. Soğurucu algılama sürecinden ayrıldığı için tamamen optimize edilebilir ve kuantum verimliliği %90-100'e kadar çıkabilir(Rieke, 2021).

Birçok termal dedektör türü, elektromanyetik radyasyonun geniş spektral aralığında çalıştırılır. Dedektör çıkışındaki sinyal, dedektör üzerine gelen ışık gücüne bağlıdır, fakat spektral içeriğine bağlı değildir. Radyasyon siyah bir yüzey kaplamasında soğurulduğundan, spektral tepki çok geniş olabilir. Şekil 2.24'de bir termal dedektörün şeması gösterilmiştir. IR teknolojisindeki en yaygın dedektörler bolometreler, termopiller ve piroelektrik dedektörlerdir (Rogalski, 2012).



Şekil 2.24. Termal dedektörün şematik diyagramı.

Bolometre

Bolometrenin klasik basit formu Şekil 2.25'de gösterilmiştir. Bir bolometre genellikle, empedansı yüksek derecede sıcaklığa bağlı olan ince, karartılmış bir pul veya levhadır.

Hem sinyalleri düşük gürültülü bir amplifikatöre bağlamak için uygun bir dirence hem de büyük bir sıcaklık direnç katsayısına sahip olacak şekilde katkılanmış küçük bir silikon veya germanyum çipinden oluşur. Dedektör çipi, çipe lehimlenen veya yapıştırılan çok ince uçlarla elektrik kontakları arasına yerleştirilir. Bu kablolar ısı emiciye termal bağlantıyı sağlar ve ayrıca dedektörün elektrik direncini belirlemek için ölçülebilen bir voltaj oluşturmak için bir akım taşır. Yüksek giriş empedanslı bir amplifikatör, direncindeki değişikliklere yanıt olarak değişen bolometre üzerindeki voltajı izler. Direnç çipin sıcaklığının güçlü bir fonksiyonu olduğundan, voltajdaki değişiklikler giriş gücündeki değişikliklerin bir ölçüsüdür. Gerekirse dedektör, foton soğurulmasını arttırmak için siyah boyayla kaplanır (Rieke, 2021).



Şekil 2.25. Bolometre yapısı.

Bolometreler çeşitli türlere ayrılabilir. En yaygın kullanılan türler metal, termistör ve yarıiletken bolometrelerdir. Dördüncü tür ise süper iletken bolometredir. Bu bolometre, direncin geçiş sıcaklığı aralığı boyunca önemli ölçüde değiştiği bir iletkenlik geçişi üzerinde çalışır (Rogalski, 2012). Yarı iletken veya süper iletken sıcaklık sensörlerini temel alan bolometreler, düşük ışık seviyeleri için en gelişmiş termal dedektör biçimidir ve özellikle milimetre altı spektral aralıkta birçok uygulama için tercih edilen dedektördür. Mümkün olan en yüksek performansı elde etmek için bu tür dedektörlerin 1

K'nin altına soğutulması gerekir (Rieke, 2021). Şekil 2.26'da farklı türdeki bolometrelerin direncinin sıcaklığa bağımlılığının grafiği gösterilmektedir.



Şekil 2.26. Üç bolometre malzeme tipinin direncinin sıcaklığa bağımlılığı (Rogalski, 2012).

Bolometre sinyali elektronik olarak üretilir ve dolayısıyla bu dedektörler, foton dedektörlerinin performansını da sınırlayan temel elektronik gürültü mekanizmalarına tabidir. Ek bir temel gürültü türü, bolometre termal bağlantısı boyunca ısı emicisine giden termal dalgalanmalardan kaynaklanır. Sonuç olarak, yüksek performans yalnızca çok düşük sıcaklıklarda elde edilebilir; bu, bolometre sinyallerini okumaya yönelik yaklaşımların yanı sıra uygulama aralığını da güçlü bir şekilde etkileyen bir durumdur (Rieke, 2021). Genellikle bolometreler 8 μ m– 12 μ m mertebesindeki IR dalga boylarını tespit etme kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, bu optimal dalga boyunun çok altındaki bir aralıkta algılama gerektirdiğinden, CO₂ dedektörleri gibi gaz sensörlerinde pek verimli değildir. Bu gibi durumlarda farklı düzenlemeler yapılması gerekir (Jha, 2022).

Termopil

Termopil en eski IR dedektörlerinden biridir ve yapısı termoçiftlere dayanmaktadır. Şekil 2.27'de gösterildiği gibi bir termoçift seri olarak bağlanmış iki farklı metalden oluşur.

Radyasyonu tespit etmek yani ışığın soğurulması amacıyla bir metal bağlantı noktası genellikle karartılır. Bu bağlantı noktasının aydınlatılmayan diğer bağlantı noktasına göre sıcaklık artışı bir voltaj üretir. Bu etki tüm termoçift sıcaklık sensörlerinin temelini oluşturur. Termopillerde kullanılan termoçift malzemeleri genellikle bizmut (Bi) ve antimondur (Sb) ve bunlar nispeten yüksek bir termoelektrik katsayıya (sıcaklık farkına tepki olarak indüklenen voltajın büyüklüğünün bir ölçüsü) sahiptir. Bir termoçift tipik olarak düşük bir çıkış voltajı üretir, bu da düşük bir tespit edilebilirliğe neden olur ve bir algılama cihazı olarak kullanımını sınırlar. Bu nedenle, çıkış voltajını arttırmanın bir yolu, birçok termoçift bağlantısını (tipik olarak 20 ila 120) seri olarak bağlamaktır. Radyasyonu toplamak için tüm sıcak bağlantı noktaları birbirine yakın yerleştirilir (*Thermopile Sensor Physics*, n.d.).



Şekil 2.27. Termoçift dedektörünün çalışma prensibi.

Bir termopilin tipik çalışması Şekil 2.28'de gösterilmektedir. Termopil diski dairesel bir termoçift dizisinden oluşur. Optik radyasyon, çıkış voltajını oluşturan disk tarafından soğurulur. Disk üzerindeki ısı, diskin arka tarafındaki termopil boyunca radyal olarak yayılır ve burada bir fan veya su ile soğutulan bir soğutucuya aktarılır. Bu cihazlar geniş bant soğurma özelliğinden dolayı IR bölgesinde oldukça hassastır. Isınma ve soğuma prosesleri nedeniyle, bir termopilin tepki süresi oldukça yavaştır, genellikle saniyeler mertebesindedir. Bu zaman kısıtlaması nedeniyle, termopiller yalnızca CW (sürekli dalga) veya CW'ye yakın radyasyon kaynaklarının gücünü ölçmek için kullanılır.

Malzemenin termal kapasitesi orantılı olarak azaltılarak tepki süresi kısaltılabilir. Bununla birlikte, termal dedektörün algılaması ısı kapasitesi ile ters orantılıdır ve bu da zamansal tepki ile hassasiyet arasında genel bir değiş tokuşa neden olur (*Thermopile Sensor Physics*, n.d.).



Şekil 2.28. Bir termopil sensörünün tipik çalışması (Thermopile Sensor Physics, n.d.).

Piroelektrik

Piroelektrik dedektörler, dedektör tasarımına bağlı olarak maksimum 5 ila 400 µs genişliğe sahip kısa optik darbelerin enerjisini ölçmek için tasarlanmıştır. Bu dedektörler kalıcı dipol momentine sahip ferroelektrik kristalden yapılmıştır. Optik bir darbeye maruz kaldığında kristal ısınır ve dipol momentinin değişmesine neden olur. Bu dipol momentinin değişmesi, dedektörde optik güç ölçer veya osiloskop tarafından ölçülebilen bir voltaja dönüştürülen akımın akmasına neden olur. Şekil 2.29'da bir piroelektrik dedektör sisteminin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.29. Piroelektrik dedektör sisteminin yapısı.

Şekil 2.30'da gösterildiği gibi, ortaya çıkan termal darbe, kısa optik darbeye göre genişletilir. Bu termal darbe sırasında akım, ferroelektrik kristalden geçerek genliği artan bir voltaj yaratır. Optik güç ölçer, çıkış voltajının artmaya başladığı zaman ile çıkış voltajının zirve genliğine ulaştığı zaman arasındaki voltaj farkını ölçen bir devreye sahiptir. Bu voltaj farkı daha sonra Joule/ Volt birimindeki dedektör duyarlılığıyla sayısal olarak çarpılır ve darbenin enerjisi Joule biriminde elde edilir.



Şekil 2.30. Piroelektrik optik sensörün tipik sinyal davranışı.

Piroelektrik dedektörlerde iç elektriksel polarizasyondaki bir değişiklik ölçülürken, termistör bolometrelerinde elektrik direncindeki bir değişiklik ölçülür. Uzun bir süre boyunca termal dedektörler yavaş, duyarsız, hantal ve maliyetli cihazlardı. Ancak yarı iletken teknolojisindeki gelişmelerle birlikte belirli uygulamalar için optimize edilmektedirler. Son zamanlarda, geleneksel bütünleyici metal oksit yarı iletken (CMOS) süreçleri ve MEMS'in geliştirilmesi sayesinde, dedektörün çip üzerindeki devre teknolojisi seri üretimin kapısını açmıştır (Rogalski, 2012).

2.6.2. Fotodedektörler

Fotodedektörler fotonların yarı iletkenlerde soğurulması sonucu elektron ve boşluk çiftlerinin oluşumu prensibiyle çalışır. Termal dedektörlerden farklı olarak bu tür dedektörler, enerji soğurma oranından ziyade fotonların soğurma hızına dayanır. Ancak fotodedektörler, yalnızca gelen fotonların enerjisinin belirli bir minimum eşiğin üzerinde olması durumunda fotonları soğurabilir. Çizelge 2.1'de çeşitli yarı iletkenler için bant aralığı ve dedektörün algılayabildiği en uzun dalga boyu verilmiştir.

Malzeme	Bant Aralığı (eV)	En Uzun Dalga Boyu (μm)
Zns	3.60	0.345
CdS	2.410	0.520
CdSe	1.800	0.690
CdTe	1.500	0.830
Si	1.120	1.100
Ge	0.670	1.850
PbS	0.370	3.350
InAs	0.350	3.540
Te	0.330	3.750
PbTe	0.300	4.130
PbSe	0.270	4.580
InSb	0.180	6.900

Çizelge 2.1. Çeşitli yarı iletkenler için bant aralığı ve en uzun dalga boyları

P-N Eklemli Fotodedektör

Yaygın olarak fotodiyot olarak adlandırılan p- n eklemli yarıiletken fotodedektörler, küçük boyutları, hızlı algılama hızları ve yüksek algılama verimliliği nedeniyle optik iletişim sistemlerinde kullanılan en yaygın fotodedektör türleridir. Şekil 2.31'de p- n eklemli fotodiyotun yapısı gösterilmiştir. Bir fotodiyotta p- n eklem ters yönde öngerilimlidir, böylece bir giriş optik sinyali olmadan diyottan yalnızca çok küçük bir karanlık ters doyma akımı akar. Bir fotodiyotun temel yapısı basit bir p- n eklemi olabilse de, pratik fotodiyotlar kuantum verimliliğini artırmak için çeşitli cihaz yapılarına sahip olabilir (Hui, 2020).



Metalizasyon (katot)

Bağlantının n tarafındaki donör konsantrasyonu, p+ tarafındaki alıcı konsantrasyonundan daha azdır. P katmanı çok incedir ve cihazın ön yüzeyinde termal difüzyon veya n tipi silikon üzerine iyon implantasyonu yoluyla oluşturulur. Aktif alan, yansıma önleyici bir malzeme kaplamasıyla (örneğin silisyum nitrür (Si₃N₄)) kaplanmıştır, böylece fotodiyodun verimliliği arttırılabilir. Metalize omik kontaklar terminalleri sağlar.

Silisyum (Si) yarı iletken malzemesi bir fotodiyot için en çok tercih edilen malzemedir. 1,1 eV'lik bant aralığıyla en yüksek algılama hassasiyeti 800 ila 950 nm arasındaki IR bölgesindedir. Daha kısa dalga boylarında hassasiyet düşer. $\lambda < 700$ nm için ışık, bağlantı

Şekil 2.31. Yoğun katkılı p tarafına sahip bir p- n eklemli fotodiyot yapısı.

noktasına ulaşmadan önce p katmanında soğurulur. Bu nedenle, daha kısa dalga boylarında duyarlılığı arttırmak için p katmanının genişliğinin daha küçük olması gerekir

P tipi bölgede fazla sayıda boşluk ve n tipi bölgede fazla miktarda elektron bulunduğundan, boşluklar difüzyon nedeniyle n tarafına doğru, elektronlar ise p tarafına doğru yayılır ve bunun sonucu p- n geçiş bölgesinde bir yük taşıyıcılardan arınmış bölge oluşur (tükenme bölgesi). Tükenme bölgesinde n tarafından p tarafına doğru yönelmiş bir elektrik alanı oluşur. Bu elektrik alanı, yüklerin tükenme bölgesi boyunca daha fazla hareket etmesini önleyecek bir güce sahiptir.

Şekil 2.32'de, optik sinyalin p tipi taraftan enjekte edildiği bir p- n bağlantı fotodiyotunun yapısını göstermektedir. P ve n bölgelerinin her ikisi de oldukça iletkendir ve elektrik alanı yalnızca fotonların fotoakım üretmek için soğurulduğu tükenme bölgesi içinde oluşur. Işık algılama verimliliği, η , $\eta \propto 1 \exp(-\alpha W_{dp})$ olarak tükenme bölgesindeki foton soğurulmasıyla orantılıdır; burada α ve W_{dp} , soğurma katsayısı ve tükenme katmanının genişliğidir. Bu nedenle verimli optik soğurma için geniş bir tükenme katmanına sahip olmak arzu edilir (Hui, 2020).



Şekil 2.32. P- n fotodiyottaki foton soğurulması.

Kuantum Kuyusu IR Fotodedektör (QWIP)

QWIP'ler, bant aralığı normalde yalnızca kısa dalga boyu (≈ 10000 nm) bölgesindeki ışığı soğurmalarına izin veren malzemeleri (örneğin, galyum arsenit (GaAs)/ alüminyum galyum arsenit (AlGaAs)) kullanarak uzun dalga boyunda (5000–10000 nm) IR algılama olanağı sağlar. İnce (<500 Å) katmanların kullanılması, soğurucu dalga boyunun malzeme kimyası yerine malzeme geometrisi tarafından kontrol edilmesine olanak tanır.

Süper kuyular veya kuantum kuyusu yapıları, normalde 50 ila 500 Å kalınlığındaki ultra ince yarıiletken katmanların bir yığınından oluşur. Farklı bileşimlerdeki iki yarı iletken bir araya getirildiğinde bir heteroarayüz oluşturur. AlGaAs/ GaAs ve indiyum alüminyum arsenit (InAlAs)/ indiyum galyum arsenit (InGaAs) gibi tip III-V bileşik yarı iletkenler, kolayca katkılanabildikleri ve alaşım bileşimleri, farklı bant aralıklarına sahip yarıiletken katmanlar oluşturacak şekilde kolaylıkla değiştirilebildikleri için, büyüyen ve gelişen kuantum kuyusu yapıları için en iyi yarı iletkenlerdir. Kuantum kuyusu katmanlarının kalınlığı, elektronun ortalama serbest yolundan daha az olduğunda (tipik olarak 50 ila 100 Å), elektron ve delikler normal üç boyutlu hareketlerine sahip olamazlar. Bu, taşıyıcıların katman düzleminde iki boyutta hareket etmesini kısıtlar. Bu kuantize edilmiş hareket nedeniyle, ayrık enerji seviyelerinin yeni bir bandı üretilir.

Işık enerjisinin bir kuantum kuyusu yapısı tarafından soğurulması, bir elektronun "çoklu değerlik alt bantlarından" "çoklu iletim alt bantlarına" atlamasına neden olabilir. Böylece elektronun malzeme özellikleri (bant aralığı) ve aynı zamanda geometrik özellikleri tarafından kararlaştırılmayan ışık dalga boylarını soğurmasına olanak tanır.

QWIP'lerde ışık enerjisi, bağlı durumdaki bir elektronu süreklilik içindeki uyarılmış bir duruma aktarır. Şekil 2.33, L kuantum kuyunun genişliği ve V₁, V₂ bariyer yükseklikleri olmak üzere bir AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu yapısını göstermektedir. IR radyasyonu tarafından uyarılan elektron, harici bir elektrik alan uygulanarak katkılı GaAs kuyusundan dışarı doğru sürüklenir. V₁, V₂ ve L kontrol edilerek, bir QWIP'in spektral tepkisi, 3000– 5000 veya 800 – 12000 nm'lik istenen IR penceresi için değiştirilebilir (Bass vd., 2010).



Şekil 2.33. AlGaAs/ GaAs kuantum kuyusu ile IR algılama.

Çok periyotlu bir kuantum kuyusu IR fotodetektörü Şekil 2.34'de gösterilmektedir.



Şekil 2.34. Çok periyotlu AlGaAs/ GaAs QWIP.

QWIP'ler yüksek algılayabilirlik, iyi bir homojenlik, yüksek verim, çoklu spektral pencereler ve içsel radyasyon sertliği özellikleri ile çok sayıda görüntüleme ve spektroskopi uygulaması için iyi bir dedektör seçenekleridir.

Işık Algılamada Fiziksel Süreçler

Radyasyonun tespiti esasen madde ile ışığın etkileşiminin bir sürecidir. Öne çıkan süreçler fotoiletkenlikve fotovoltaik etkidir.

Fotoiletkenlik

Yarı iletkenlerdeki küçük bant aralığının (Δ) bir sonucu, bir yarı iletken örneğini Δ /h'den daha büyük frekanslı bir ışıkla aydınlatarak ek taşıyıcılar oluşturmanın mümkün olmasıdır. Bu, malzemede iletkenliğin artmasına neden olur ve bu olay, içsel fotoiletkenlik olarak bilinir. Etki, aydınlatmanın yoğun bir ışık hüzmesi ile olduğu durumlar dışında, yüksek sıcaklıklarda çok belirgin değildir. Düşük sıcaklıklarda aydınlatma, lokalize taşıyıcıların iletim veya valans bandına uyarılmasıyla sonuçlanır.

Gelen bir foton, bir elektron deliği çifti üretmek için yeterli enerjiye sahip olmasa bile, serbest elektrona bağlı bir delik çifti (donör seviyesinde uyarılma için) veya serbest boşluğa bağlı bir elektron (alıcı seviyesi için) oluşturarak safsızlık merkezlerinde hala bir uyarım üretebilir. Eğer E_i safsızlık iyonizasyon enerjisi ise, dışsal fotoiletkenlik için radyasyon frekansı en azından E_i /h olmalıdır.



Şekil 2.35. Yarı iletkenlerde fotouyarılma.

Uzunluğu boyunca (x yönü) yayılan bir ışık hüzmesi tarafından aydınlatılan ince bir yarı iletken levhanın x konumundaki radyasyon yoğunluğu I (Watt/ m²) olarak ifade edilir. Birim uzunluk başına soğurma katsayısı α ise birim uzunluk başına soğurulan güç α I'dır. Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak yoğunluktaki değişiklik Şekil 2.36'da ve aşağıdaki denklemde verilmektedir:

$$I = I_0 e^{(-\alpha x)} \tag{2.1}$$



Şekil 2.36. Yarı iletken uzunluğu boyunca mesafeye bağlı olarak yoğunluktaki değişiklik.



Şekil 2.37. Yarı iletkende soğurulan fotonun zamana bağlı değişimi.

Kuantum verimliliği (η), elektron- delik çiftleri üreten soğurulmuş fotonların oranıdır. Birim zamanda üretilen çiftlerin sayısı şu şekilde verilir:

$$\Delta n = \Delta p = \frac{\eta \alpha l}{hv} \tag{2.2}$$

Prensip olarak, aydınlanma süreci, soğurulan enerji miktarı zamanla doğrusal olarak artacağından, taşıyıcıların sayısında sürekli bir artışa yol açacaktır. Bununla birlikte, uyarılmış çiftlerin sınırlı bir yaşam süresi ($\approx 10^{-7} - 10^{-2}$ s) vardır.

Fotovoltaik Etki

Şekil 2.38'de gösterilen fotovoltaik etki, boşluk yükü katmanına sahip bir malzemede örneğin bir p- n bağlantısında meydana gelebilir. Yeterli enerjiye sahip bir foton, bir elektronu değerlik bandından iletim bandına uyarmak için dedektör malzemesi tarafından soğurulabilir. Uyarılmış elektron, akıma olan katkısıyla gözlemlenebilir. Bir fotovoltaik dedektör öngerilim voltajı uygulanmadan çalıştırılabilir.



Şekil 2.38. Fotovoltaik etki.

Dedektörlerin Performans Parametreleri

Bir dedektörün performansı belirli değerlerle tanımlanır. Bunlar duyarlılık, kuantum verimliliği, spektral cevap, gürültü eşdeğer gücü ve algılayıcılıktır.

• Duyarlılık

Bir dedektörün duyarlılığı (R), üretilen fotoakım (I) ile dedektöre gelen optik güç miktarına (P_o) oranı olarak verilir.

$$R = \frac{I}{P_0} \left[A/W \right] \tag{2.3}$$

• Kuantum Verimliliği

Bir dedektör tüm fotonları toplayıp onları elektron-delik çiftlerine dönüştüremez. Gelen foton başına üretilen elektronların sayısı, genellikle yüzde olarak ifade edilen kuantum verimliliği olarak tanımlanır.

$$\eta = \frac{\ddot{u}retilen\ elektron\ sayısı}{gelen\ foton\ sayısı} \times (\%100)$$
(2.4)

Harici devrede I fotoakım ve Po optik güç varsa (tanımdaki yüzde düşülerek),

$$\eta = \frac{I/q}{P_0/hv} \tag{2.5}$$

Buradan da,

$$R = \frac{qn}{hc}\lambda\tag{2.6}$$

duyarlılığın dalga boyuna bağlı olduğu görülmektedir. Burada λ dalga boyu, h Planck sabiti, c ışık hızı, q elektron yüküdür. İdeal bir fotodedektör için kuantum verimliliği 1 alınırsa duyarlılığın dalga boyu ile lineer bir değişimi beklenir.

• Spektral Cevap

Bir dedektörün spektral tepkisi, dedektörün çıkış sinyalinin, gelen radyasyonun dalga boyundaki değişime göre değişmesiyle belirlenir. Kuantum verimliliği dalga boyuna bağlı olduğundan yanıt, $\eta = 1$ durumunda olacağı gibi doğrusal değildir.

Fotonun enerjisi, bir elektronu enerji bariyerinden (Δ) geçirmek için yeterli olmalıdır. Δ eV cinsinden ise dedektörün yanıt vereceği maksimum dalga boyu:

$$\lambda_{\max}(nm) = \frac{1240}{\Delta(eV)} \tag{2.7}$$

Ancak eşiğin üzerindeki değerlerde yanıt aniden sıfıra düşmez. Bunun nedeni, moleküllerin termal enerjisinden dolayı, cihazın malzemesinin soğurma katsayısının şu şekilde verilmesidir:

$$\alpha = \alpha_0 e^{E/\Delta} \tag{2.8}$$

Burada E foton enerjisidir. Şekil 2.39'da bir foton dedektörünün spektral cevabı gösterilmektedir.



Şekil 2.39. Bir foton dedektörü için spektral cevap.

• Gürültü Eşdeğer Gücü

Bir dedektördeki gürültünün kaynağı termal dalgalanmadır. Yüklü parçacıklar her zaman hareket halindedir. Cihaza herhangi bir radyasyon gelmese bile büyüklüğü nanoamper (nA) veya pikoamper (pA) cinsinden olabilen akım arka planda üretilir. Buna karanlık akım denir. Bir dedektörün bu tür rastgele gürültü ile gelen sinyali ayırt edebilmesi için sinyalin gücünün gürültü sinyalinden daha büyük olması gerekir. Bir dedektör tasarımında sinyal/gürültü oranı (SNR) şu şekilde tanımlanır:

$$SNR = \frac{sinyal g \ddot{u} c \ddot{u}}{g \ddot{u} r \ddot{u} l t \ddot{u} g \ddot{u} c \ddot{u}}$$
(2.9)

Gürültü eşdeğer gücü (NEP), bir dedektör için önemli bir değerdir. Dedektörün tespit edebileceği minimum gücü belirlemek için NEP kullanılır. NEP, gürültü işareti tarafından üretilen işaretin büyüklüğüne eşit bir çıkış işareti üreten ışık şiddetidir. Böylece NEP, tespit edilebilecek minimum ışık şiddetinin bir ölçüsünü vermektedir.

Bir dedektör için NEP genellikle belirli dalga boyu ve sıcaklıkta belirtilir. NEP ölçümü için gelen radyasyonun bant genişliği genellikle 1 Hz olarak alınır.

$$NEP = \frac{g \ddot{u} r \ddot{u} l t \ddot{u} a kimi \left(A / \sqrt{Hz} \right)}{dalga boyundaki radyant hassasiyeti \left(A / W \right)}$$
(2.10)

• Algılayabilirlik

Fotodedektörün algılayabilirliği genellikle NEP'in tersi olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$D^* = \frac{\left(A_d\right)^{1/2}}{NEP}$$
(2.11)

Algılayabilirlik (D*), dedektörlerin normalleştirilmiş sinyal-gürültü performansını karakterize eden ana parametredir ve aynı zamanda şu şekilde de tanımlanabilir:

$$D^* = \frac{R_i \left(A_d \Delta f\right)^{1/2}}{I_n} \tag{2.12}$$

Fotodedektörlerde radyasyon, kristal örgü atomlarına veya safsızlık atomlarına bağlı elektronlarla veya serbest elektronlarla etkileşime girerek malzeme içinde soğurulur. Fotodedektörler, radyasyon gücü başına tepkinin seçici bir dalga boyu bağımlılığını gösterir. Hem iyi bir sinyal-gürültü performansı hem de çok hızlı bir tepki sergilerler. Ancak bunu başarmak için foton IR dedektörlerinin kriyojenik soğutmaya ihtiyacı vardır. Bu, yük taşıyıcılarının termal oluşumunu önlemek için gereklidir. Termal geçişler optik geçişlerle rekabet halinde olup soğutulmayan cihazları çok gürültülü hale getirir (Rogalski, 2012).



Şekil 2.40. Bir foton ve termal dedektör için bağıl spektral cevap (Rogalski, 2012).

Cihazın kontaklarından akan akım, jenerasyon (üretim) ve rekombinasyon (yeniden birleşme) süreçlerinin istatistiksel doğası nedeniyle (optik üretimdeki dalgalanma, termal üretim ve ışınımlı ve ışınımsız rekombinasyon oranları) gürültülüdür. Fotoakım ve gürültü akımı için akım kazancının aynı olduğu varsayılırsa gürültü akımı;

$$I_n^2 = 2q^2 g^2 \left(G_{op} + G_{th} + R \right) \Delta f$$
 (2.13)

Burada G_{op} optik üretim hızıdır, G_{th} termal üretim hızıdır, R sonuçtaki rekombinasyon hızıdır ve f frekans bandıdır.

Şekil 2.41. ticari olarak temin edilebilen bir dizi IR dedektörünün spektral algılayabilirlik eğrilerini göstermektedir.



Şekil 2.41. Belirtilen sıcaklıkta çalıştırıldığında çeşitli dedektörlerin D* değerlerinin karşılaştırılması(Brenner vd., 2006)

Yakın IR'nin kısa dalga boyu kısmı için sıradan silikon fotodiyotlar kullanılabilir. Aktif bölgenin kalınlığına bağlı olarak 1 µm ila 1,1 µm arasındaki dalga boyları için duyarlılık düşer (Paschotta, 2023).

Daha uzun dalga boyları için, daha düşük bant aralığı enerjisine sahip yarıiletken malzemeler gereklidir, böylece daha düşük enerjiye sahip fotonlar, bir miktar fotoakıma katkıda bulunan bir taşıyıcı oluşturmak için yeterlidir. İndiyum galyum arsenit (InGaAs) dedektörleri yaklaşık 1,7 µm'ye kadar dalga boyları için uygundur. Benzer şekilde, germanyum (Ge) fotodiyotları yaklaşık 0,9 µm ila 1,6 µm'de kullanılabilir. 5 µm'nin ötesinde daha uzun dalga boyları için indiyum antimonid (InSb) fotodiyotlar mevcuttur (Paschotta, 2023).

2.7. Optik Gaz Hücre Tasarımları

Bir IR gaz sensöründeki gaz hücresinin üç amacı vardır. Birinci amaç, yayılan IR radyasyonun dış çevre faktörlerinden etkilenmeden dedektöre ulaşması için yol

sağlamaktır. İkinci amaç, hedef gaz etkileşimi için sınırlı bir rejim oluşturmak ve üçüncü amaç ise gaz algılama sistemine fiziksel destek olmaktır (Jha, 2022). Literatürde üç adet temel optik gaz hücre tasarımı bulunmaktadır. Bunlar yüz yüze, düzlemsel ve boşluklu gaz hücresi tasarımlarıdır.

2.7.1. Yüz Yüze Gaz Hücresi

Şekil 2.42'de gösterilen optik gaz hücresi, IR kaynak ve dedektörünün boru şeklinde kanal tipi bir konfigürasyonda birbirinin önüne yerleştirildiği en yaygın gaz hücresi türüdür (Jha, 2022).



Şekil 2.42. Verici ve dedektörün karşı karşıya olduğu yüz yüze hücre topolojisi.

Sklorz vd. (2012), yüz yüze hücre topolojisine dayanan, konik şekilli hücre ve Fresnel lenslerin kombinasyonu kullanılarak bir etilen gazı sensörü geliştirdi. Şekil 2.43'de silindirik ve konik hücre şematikleri gösterilmektedir. Konik hücre kullanılarak en iyi sinyal yoğunluğu, elde edildiğini söyledi(Sklorz vd., 2012).



Şekil 2.43. Yüz yüze topolojisine dayanan gaz hücresi. IR kaynağı (I), iki farklı hücre şekli (II), mercekler (III) ve termopil dedektörler (IV) olarak gösterilmiştir (Sklorz vd., 2012).

Temel metalik gaz hücrelerinin dışında Peng vd., optimum iletim bandı CO₂'nin soğurma spektrumuyla örtüştüğü için ve bir filtre görevi görebildiğinden, gaz hücresi olarak Şekil 2.44'de gösterilen orta IR içi boş fiberi kullandı (Jha, 2022).



Şekil 2.44. CO₂ gazı NDIR algılama sisteminin şeması.

2.7.2. Düzlemsel Gaz Hücresi

Tan vd.(2015), Şekil 2.45'de gösterilen düzlemsel bir gaz hücresi tasarladılar. Optik yol uzunluğunu iyileştirmek için, IR ışığın tespit edilmeden önce iki kez yansıtılacağı şekilde üst düzlem, alt düzlem ve kavisli bir duvardan oluşan gaz hücresi tasarladılar (Jha, 2022).



Şekil 2.45. Düzlemsel topolojiye uygun gaz hücresinin tasarımı (a) metal dış kabuk; (b) metal ağ; (c) altınla doldurulmuş gaz hücresi; (d) çok delikli yüzey; (e) ışık kaynağı ile dedektörler ve (f) parçaların bir araya gelmiş hali.

Wittstock vd (2017), CH4'ün alt patlama limitini izlemek amacıyla Şekil 2.46'da gösterilen düzlemsel bir gaz sensörü tasarladı ve geliştirdi. Çift fotoakustik dedektörlü düzlemsel bir yapı kullandılar. IR kaynağı olarak LED kullanıldı, sırasıyla 25 mm ve 20 mm'lik optik yolların elde edilebildiği iki yarım elipsoidin odak noktalarına konumlandırıldı. Wittstock vd.(2017) böyle bir yapı kullanarak IR kaynağının ışık yoğunluğundaki sapmaları ortadan kaldırdığını gözlemledi (Jha, 2022).



Şekil 2.46. Reflektörlü gaz hücresi tasarımının şematik çizimi

2.7.3. Boşluklu Gaz Hücresi

Boşluklu bir NDIR gaz sensörü tasarlarken optik yolun yanı sıra boşluk içindeki yansımaların sayısı da çok önemlidir, çünkü yansımalarla birlikte IR sinyalin enerjisi azalır (Jha, 2022). Şekil 2.47'de optik sensörlerin en yaygın türlerinden biri olan NDIR sensörünün şematik diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.47. NDIR sensörünün şematik diyagramı.

Jing vd. (2021), Ansys ve Tracepro yazılımlarının yardımıyla iyi geçirgenliğe sahip Şekil 2.48'de gösterilen MEMS boşluk bazlı gaz hücresini tasarladılar.



Şekil 2.48. Tam entegre IR gaz sensörünün yapısı (Jing vd., 2021).

Han vd.(2013), CO₂ gazının doğru tespiti için IR ışın yoğunlaştırıcısı Şekil 2.49 (a)'da gösterilen olarak içinde merdiven benzeri bir yapıya sahip konik bir optik boşluk tasarladı.



Şekil 2.49. (a) Merdiven şeklinde konik reflektör örneği, (b) geleneksel olarak konik reflektör.

Merdivenle konik bir reflektör optik boşluğu kullanmanın avantajı, sabit bir geliş açısını korurken optik yoldaki yansıma sayısını azaltmasıdır. Şekil 2.50 (b)'de merdivenle konik

reflektör optik boşluğu tasarımının ışın izleme simülasyonu gösterilmiştir. Bu tip boşluğu kullanan NDIR sensörü aynı zamanda ortam sıcaklığı dalgalanmalarına karşı geleneksel gaz algılama yapısına göre daha az duyarlıdır (Jha, 2022).



Şekil 2.50. (a) geleneksel olarak konik reflektör optik boşluğu ve (b) merdivenle konik reflektör optik boşluğu için Light Tools tarafından yapılan ışın izleme simülasyonları.

Geleneksel gaz hücrelerinin dışında çok sayıda tasarım önerilmiştir. Mayrwöger vd., (2010), Zemax yazılımını kullanarak Şekil 2.51'de gösterilen dönel simetrik elipsoid hücre tasarlamış ve bu tasarımın algılama özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır.



Şekil 2.51. Dönel simetrik elipsoid simülasyonu (Mayrwöger vd., 2010).

Şekil 2.52'de ise tasarımın üstten görünümü verilmektedir. Spiral geometri, sistemin hassasiyetinin soğurucu gaz boyunca optik yolun uzunluğu kadar artması gerçeğine

dayanan Beer- Lambert yasasının doğrudan bir sonucudur. Bununla birlikte, duvarlardaki çoklu yansımaların her biri yoğunluk kaybıyla ilişkilidir ve bu nedenle sinyalin azalması nedeniyle optik uzunluk sonsuza kadar uzatılamaz. Bu nedenle, NDIR gaz sensörlerinin tasarımında optik yol uzunluğu ile duvar yansımalarının sayısı arasında bir uzlaşma bulmak önemlidir. Hücrenin spiral geometrisinin, cihazın hassasiyetinin arttırılmasıyla doğrudan ilgili olan daha büyük optik uzunluğun elde edilmesine yardımcı olduğunu bulmuşlardır (Jha, 2022).



Şekil 2.52. Dönel simetrik elipsoid simülasyonunun üstten görünümü (Mayrwöger vd., 2010).

2.8. NDIR Yöntem

NDIR tekniği, ilk defa 1943 yılında Luft tarafından gösterilen, gaz moleküllerinin IR algılama tekniğidir. Genelde CO ve CO₂ gaz konsantrasyonunu ölçmek için kullanılır (Lee & Kester, 2016). Temel bir NDIR gaz algılama sisteminde (bkz. Şekil 2.53), genelde yüz yüze hücre topolojisi kullanılır. Hücrenin bir ucunda IR ışık kaynağı diğer ucunda ise IR dedektör bulunur. Hücrenin birer ucundan gaz girişi ve çıkışı sağlanır. Bu gaz, IR ışık dedektörünün önündeki optik filtreye doğru hareket eder. Optik filtre dedektörün önüne konumlandırılır ve dedektöre gelen ışığın istenilen dalga boyunda olmasını sağlar. Bu sebeple bu yönteme 'dağılmayan' denmiştir çünkü dalga boyu önceden filtrelenmez.

Hücre içindeki gaz yoğunluğuna göre dedektör üzerine düşen ışık miktarı değişiminden çıkış sinyali okunarak gaz yoğunluğu tespit edilmiş olunur.



Şekil 2.53. NDIR sensör gösterimi

2.8.1. NDIR için Beer- Lambert Yasası

Birçok gaz molekülünün NIR ve MIR aralığında belirli titreşim ve dönme soğurma çizgileri vardır ve bu benzersiz soğurma genellikle onların varlığını ve konsantrasyonunu tespit etmek için kullanılır (Rothman vd., 2013). CO₂'nin 4,25 µm dalga boyu civarında güçlü bir soğurma bandına sahip olduğu iyi bilinmektedir. Bu soğurma, monokromatik ışık için Beer-Lambert yasası ile niceliksel olarak tanımlanmaktadır:

$$I = I_0 e^{-\varepsilon cl} \tag{2.14}$$

Burada:

- *I* : ortamda iletilen ışınım gücü [W]
- Io : kaynaktan çıkan ışınım gücü [W]
- ε : gaz soğurma katsayısı [cm⁻¹ ppm⁻¹] ya da [mol⁻¹ cm²]
- *l* : optik yol uzunluğu [cm]
- c : gaz konsantrasyonu [ppm] ya da [mol cm⁻³]

Kaynaktan dedektöre iletim transmittans böylece şu şekilde sağlanır:

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\varepsilon cl} \tag{2.15}$$

Sabit bir sensör konfigürasyonu (sabit optik yol uzunluğu) için iletimin CO₂ konsantrasyonuyla ilişkili olduğu görülebilir, böylece iletim değişikliği ölçülerek gaz numunesindeki CO₂ konsantrasyonu çıkarılabilir (Jia vd., 2019).

$$A = \frac{I}{I_0} = e^{\varepsilon cl} \tag{2.16}$$

Absorbans, ortamdan iletilen ışınım gücünün, başlangıç ışınım gücüne oranının doğal logaritması olarak tanımlanmaktadır (Carbon dioxide (CO2) measurement using Non-Dispersive Infrared (NDIR) Spectroscopy with lead selenide (PbSe) photodetectors, 2020).

Şekil 2.54'de gösterilen tipik bir NDIR CO₂ sensörünün yapısı, dört öğeden oluşmaktadır: 4,25 μm civarında bir optik kaynak, bir gaz odası, optik bant geçiren filtreler ve dedektörler. Aktif filtre tipik olarak CO₂'nin güçlü soğurma çizgisine sahip olduğu (aktif kanal) 4,25 μm'de ortalanır ve referans filtre tipik olarak hiçbir ortak gaz molekülünün soğurulmadığı (referans kanal) 3,9 μm'de ortalanır. CO₂ algılama ölçümü sırasında aktif kanaldaki sinyal (I_A), CO₂ soğurulması nedeniyle üstel bozulma yaşayacak fakat referans kanalındaki sinyal (I_R) ise değişmeyecektir. Böylece her iki kanaldaki sinyal karşılaştırılarak hedef gazdaki CO₂ konsantrasyonu hesaplanabilir. Referans kanalının varlığı, hem aktif hem de referans kanallar üzerinde aynı etkiye sahip olduğu varsayılarak, kaynak dalgalanmasının etkisini ortadan kaldırmaktır (Jia vd., 2019).



Şekil 2.54. Aktif ve referans filtreye sahip NDIR sensör yapısı

Şekil 2.55'de CO2'nin sönme katsayısı spektrum simülasyonu gösterilmektedir.



Şekil 2.55. CO₂'nin sönme katsayısı spektrumu (sıcaklık = 300 K, gaz basıncı = 1 atm).

Aktif dedektör çıkışı için karşılık gelen bir çıkış voltajı değişimi vardır, $V_o - V$:

$$FA = \frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{I_0 - I}{I_0} = 1 - \frac{I}{I_0} \dots$$
(2.17)

Burada:

FA : fraksiyonel absorbans

Vo: sıfır gazdaki çıktı

V: hedef gazdaki çıktı

Denklem 2.14 ve 2.17'nin yeniden düzenlenmesi ve birleştirilmesi aşağıdaki denklemi verir:

$$FA = 1 - e^{-\varepsilon cl} \tag{2.18}$$

Eğer ϵ ve *l* sabit tutulursa, *FA* Şekil 2.56'da gösterildiği *c*'ye karşı çizilebilir. Burada ϵl 115, 50, 25, 10 ve 4.5 alınmıştır. *FA*'nın değeri *c* ile artar, ancak sonunda yüksek gaz konsantrasyonlarında doygunluğa ulaşır (R. Lee & Kester, 2016).



Şekil 2.56. $\epsilon l = 115, 50, 25, 10$ ve 4.5 için tipik fraksiyonel absorbans.

Bu ilişki, herhangi bir sabit sistem kurulumu için, gaz seviyesindeki bir değişikliği çözme yeteneğinin, düşük konsantrasyonlarda, yüksek konsantrasyonlara göre daha iyi olduğu anlamına gelir. Fakat ϵ ve l, gerekli gaz konsantrasyonu aralığı için optimum soğurmayı sağlayacak şekilde ayarlanabilir. Bu, uzun optik yolların düşük gaz konsantrasyonları için daha uygun olduğu ve kısa optik yolların yüksek gaz konsantrasyonları için daha uygun olduğu ce kısa optik yolların yüksek gaz konsantrasyonları için daha uygun olduğu ve kısa optik yolların yüksek gaz konsantrasyonları için daha uygun olduğu anlamına gelir. (R. Lee & Kester, 2016).

2.8.2. NDIR Gaz Ölçüm Sistemlerinin Performansı

NDIR gaz ölçüm sisteminin performansı, tespit limiti *DL* [ppm] veya başka bir deyişle sistem tarafından tespit edilebilecek minimum konsantrasyon değişikliği ile karakterize edilir. Tespit limiti büyük ölçüde, kullanılan IR dedektörlerin performans özelliklerine bağlıdır. Dedektör *NEP*'inin denklem 2.19'a göre 1 ppm gaz konsantrasyonu için iletilen ışınım gücündeki değişim oranı olarak hesaplanır (Carbon dioxide (CO2) measurement using Non-Dispersive Infrared (NDIR) Spectroscopy with lead selenide (PbSe) photodetectors, 2020).

$$DL = \frac{NEP}{I'} \tag{2.19}$$

Bir IR dedektörün *N*EP'i, sinyal- gürültü oranını 1 veren sinyal gücü olarak tanımlanır ve denklem 2.20 kullanılarak hesaplanır.

$$NEP = \frac{\sqrt{A}\sqrt{\Delta f}}{D^*} \tag{2.20}$$

Burada:

A: kızılötesi dedektörün aktif alanı [cm²]

∆f: bant genişliği [Hz]

D*: IR dedektörün özgül algılaması [cm Hz^{1/2} W⁻¹]

Herhangi bir NDIR sistemi için, daha yüksek *D** değerine sahip bir IR dedektör, düşük tespit limitlerine ve gaz konsantrasyonunun yüksek ölçüm çözünürlüğüne ulaşmak için önemlidir. Ayrıca bazı zorlu uygulamalar için yüksek ölçüm hızı da gereklidir. IR dedektörün frekans tepkisi, NDIR sisteminin ölçüm hızına katkıda bulunan ana faktördür. Sistemin ölçüm hızının dedektörün bant genişliğine bağımlılığı Nyquist kriterleri tarafından şu şekilde verilmektedir:

$$f_s \ge 2f \tag{2.21}$$
Burada: f_s: dedektörün gerekli bant genişliği [Hz] f: istenilen ölçüm hızı [Hz]

dikkate alınan IR dedektörün, alınan optik sinyali, istenen ölçüm oranının en az iki katı bir oranda örnekleyebilmesi gerekir. Bu nedenle, 100 Hz'lik örnek bir ölçüm hızı için bant genişliği en az 200 Hz olan bir IR dedektör seçilmelidir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında CO₂ tespiti için NDIR yöntem kullanılmıştır. Kaynak olarak halojen ampul ve monokromatör, dedektör olarak ise fotodiyot ve termopil çeşitlerinden yararlanılmıştır. Yüz yüze hücre topolojisine dayanarak çeşitli optik gaz hücreleri tasarlanmıştır. CO₂ gaz miktarı her deneyde EL-FLOW Select F-201CV marka akış ölçer ile gözlenmiş ve sisteme lineer bir artışla gaz verilmiştir.

3.1. CO2 Ortamında Halojen Ampul- Termopilden Oluşan Ölçüm Sistemi

Yapılan deneyde CO₂ ortamında ölçüm alınmıştır. Kurulan deney sistemi Şekil 3.1'de gösterilmektedir.





Şekil 3.2'de gösterildiği gibi optik hücreye doğrudan CO₂ verilmeyip daha geniş bir ortama gaz girişi sağlanmış ve optik hücre bu ortam içerisine konulmuştur. IR kaynak olarak halojen ampul sabit akım devresi ile sürülmüştür.



Şekil 3.2. CO₂ ortamında termopil ve halojen ampulden oluşan optik hücre tasarımı.

Dedektör olarak Şekil 3.3 a'da gösterilen Hamamatsu markasına ait T11722-01 termopil dedektörü kullanılmıştır. T11722-01, CO₂ konsantrasyonunu yüksek doğrulukla tespit etmek için tasarlanmış çift elemanlı bir termopil dedektörüdür. Şekil 3.13 b'de gösterildiği gibi iki dalga boyunu (referans: 3,9 µm, CO2: 4,3 µm) aynı anda algılamak için yüksek hassasiyetli çift elemanlı bir termopil dedektörden ve iki bant geçiren filtreden oluşur.



Şekil 3.3. a) Hamamatsu T11722-01 termopil dedektörü ve b) referans (filtre 1) ve CO₂ (filtre 2) filtrelerinin geçirgenliği.

Dedektör çıkışını okuyabilmek için Şekil 3.4'de şematiği gösterilen LTC1050 opamplı bir kuvvetlendirici devresi tasarlanmıştır.



Şekil 3.4. LTC1050 opamplı devrenin şematiği.

Tasarlanan devrenin çıkışı multimetre ile ölçülmüştür. Şekil 3.5'de tasarlanan yükseltici devre ve pillerden oluşan çift besleme gösterilmektedir. Devrenin çıkış sinyali multimetre ile ölçülmüştür.



Şekil 3.5. Çift beslemeli LTC1050 kuvvetlendirici devresi ve kuvvetlendirilmiş sinyalin multimetre ile okunması.

3.2. Monokromatör ve Fotodiyottan Oluşan Ölçüm Sistemi

Yapılan deneyde Şekil 3.6'da gösterilen pirinç malzemeden yapılmış yüz yüze optik hücre tasarımı kullanılmıştır. Bu hücre içerisine akış ölçer ile CO₂ girişi sağlanmıştır. IR kaynak olarak monokromatörden 2µm dalga boyunda ışık gönderilmiştir. Sistemde Şekil 3.6'da gösterilen Thorlabs markasına ait DET10D/M InGaAs fotodedektörü kullanılmıştır. Fotodiyottaki çıkış Thorlabs PDA 200 C kuvvetlendirici ile ölçülmüştür.



Şekil 3.6. Thorlabs DET10D/M InGaAs fotodedektörü.

Oluşturulan gaz ölçüm sistemi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Monokromatör ve fotodiyot sistemi.

3.3. CO2 Ortamında Halojen Ampul ve Termopilden Oluşan Ölçüm Sistemi

Yapılan deneyde CO₂ ortamında ölçüm alınmıştır. Şekil 3.8'de oluşturulan ölçüm sistemi gösterilmektedir.



Şekil 3.8. CO₂ ortamında Halojen Ampul– Termopilden oluşan sistem tasarımı.

Optik hücreye doğrudan CO₂ verilmeyip daha geniş bir ortama gaz girişi sağlanmış ve optik hücre bu ortam içerisine konulmuştur. Şekil 3.9'da CO₂ ortamı ve bu ortama yerleştirilen optik hücre gösterilmektedir. IR kaynak olarak halojen ampul kullanılmış ve ZK-PP2K yüksek güç darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile sürülmüştür.



Şekil 3.9. CO₂ ortamında halojen ampul ve termopilden oluşan hücre tasarımı.

Dedektör olarak Şekil 3.10 a'da gösterilen Hamamatsu markasına ait T11262-01 termopil kullanılmıştır. Bu termopilde filtre bulunmamaktadır. Termopil çıkışı LTC1050 opamplı kuvvetlendirici devresi (bkz. Şekil 3.4) ile kuvvetlendirilmiş ve bu devrenin çıkışı multimetre ile ölçülmüştür.



Şekil 3.10. a) Hamamatsu T11262-01 termopil b) Hamamatsu T11262-01 termopil pencere materyalinin geçirgenlik özelliği.

3.4. Darbeli Işık Kaynağı ve Fotodiyottan Oluşan Ölçüm Sistemi

Bu ölçüm sisteminde IR kaynak ve dedektör optik hücreden tamamen ayrıdır. Yüz yüze hücre topolojisi kullanılarak 3D yazıcı ile hücre tasarımı yapılmıştır. Optik hücrenin kaynak ve dedektör yüzlerine cam yerleştirilerek ışık geçişi sağlanmıştır. CO₂ doğrudan hücre içerisine akış ölçer ile verilmiştir. Şekil 3.11'de kurulan sistem gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Sırasıyla odaklanmış IR kaynak, optik hücre, optik kıyıcı ve fotodedektör dizilimi.

IR kaynak olarak halojen ampul kullanılmıştır ve sabit akım ile beslenmiştir. Kullanılan kaynağın lens ile dedektör penceresine odaklanması sağlanmıştır. Kaynak ile dedektör arasına optik kıyıcı yerleştirilmiş ve böylece ışık kaynağının dedektöre darbeli olarak ulaşması sağlanmıştır. Şekil 3.12'de sistemde kullanılan pwm'li kaynak prensibi gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Optik kıyıcı kullanılarak darbeli kaynak üretimi.

Dedektör olarak Şekil 3.13 a'da gösterilen Hamamatsu markasına ait P11120-201 InAsSb fotovoltayik dedektörü kullanılmıştır. Dedektörün sıcaklıktan etkilenmemesi için termal soğutucu pinleri beslenmiş ve direnci sürekli takip edilerek dedektörün aynı sıcaklıkta kalması sağlanmıştır.



Şekil 3.13. a) Hamamatsu P11120-201 InAsSb fotovoltayik dedektörü ve b) dedektörün spektral cevabı.

Optik kıyıcı, bir lock- in amplifikatörle eşleştirildiğinde SNR'yi artırmak için kullanılan bir tekniktir. Mekanik kıyıcılar mekanik titreşimler ve kesik kirişler üretmektedir. Dedektör çıkışı Stanford Research System markasının SR830 DSP Lock-in Amplifier cihazı ile kuvvetlendirilip multimetreyle ölçülmesi sağlanmıştır. Ölçüm sistemi Şekil 3.14'de gösterilmektedir.



Şekil 3.14. Sistemin genel görüntüsü.

3.5. Halojen Ampul ve Termopilden Oluşan Sistemi

Yapılan deneyde pirinç malzemeden yapılmış yüz yüze hücre topolojisine dayalı optik hücre kullanılmış ve hücre içerisine doğrudan akış ölçer ile CO₂ gazı verilmiştir. IR kaynak olarak halojen ampul kullanılmış olup sabit akım ile sürülmesi sağlanmıştır. Dedektör olarak Şekil 3.3'de gösterilen Hamamatsu markasına ait T11722-01 termopili kullanılmış ve Thorlabs markasına ait Thermo Adapter ile çıkış gücü ölçülmüştür. Termopilin sadece CO₂ çıkışı (4,3 µm dalga boyu) kullanılmıştır. Şekil 3.15'de ölçüm sistemi gösterilmektedir.



Şekil 3.15. Kurulan sistemin genel görüntüsü.

3.6. 3,9 µm Referans Dalgaboyu İçeren Ölçüm Sistemi

Yapılan deneyde pirinç malzemeden yapılmış yüz yüze hücre topolojisine dayalı optik hücre kullanılmış ve hücre içerisine doğrudan akış ölçer ile CO₂ gazı verilmiştir. IR kaynak olarak halojen ampul kullanılmış olup sabit akım devresi aracılığıyla sürülmesi sağlanmıştır. Dedektör olarak Şekil 3.3 a'da gösterilen Hamamatsu markasına ait T11722-01 termopil kullanılmıştır. Termopilin referans ve CO₂ çıkışları Şekil 3.4'de gösterilen LTC1050 opamplı kuvvetlendirici devresi ile kuvvetlendirilmiştir. Elde edilen iki sinyalin farkı da diferansiyel kuvvetlendirici devresi ile alınmıştır. Çıkış, multimetre ile ölçülmüştür. Şekil 3.16'da ölçüm sistemi gösterilmektedir.



Şekil 3.16. Referanslı ölçüm sistem tasarımı.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında 6 farklı ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Bu sistemler aşağıdaki gibidir:

- 1. CO₂ Ortamında Halojen Ampul- Termopilden Oluşan Ölçüm Sistemi
- 2. Monokromatör ve Fotodiyottan Oluşan Ölçüm Sistemi
- 3. CO₂ Ortamında Halojen Ampul ve Termopilden Oluşan Ölçüm Sistemi
- 4. PWM'li Işık Kaynağı ve Fotodiyottan Oluşan Ölçüm Sistemi
- 5. Halojen Ampul ve Termopilden Oluşan Sistemi
- 6. 3,9 µm Referans Dalgaboyu İçeren Ölçüm Sistemi

Şekil 3.1'de gösterilen 1. ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiş olan sonuçlar Şekil 4.1'deki grafikte gösterilmiştir. Beklenildiği gibi CO₂ konsantrasyonuna bağlı lineer bir değişim elde edilmiştir. Optik hücredeki CO₂ miktarı arttıkça dedektör çıkışındaki sinyalde lineer azalma görülmektedir.



Şekil 4.1. 1. ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiş olan dedektör çıkış sinyalinin ve CO₂ miktarının değişim grafiği

Şekil 3.7'de gösterilen 2. ölçüm sisteminin sonuçları Şekil 4.2'deki grafikte gösterilmiştir. Beklenildiği gibi CO₂ konsantrasyonuna bağlı lineer bir değişim elde edilmiştir. Optik hücredeki CO₂ miktarı arttıkça dedektör çıkışındaki sinyalde lineer azalma görülmektedir.



Şekil 4.2. 2. ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiş olan dedektör çıkış sinyali ile CO₂ miktarının değişim grafiği

Şekil 3.8'de gösterilen 3. ölçüm sisteminin sonuçları Şekil 4.3'deki grafikte gösterilmiştir. Beklenildiği gibi CO₂ konsantrasyonuna bağlı lineer bir değişim elde edilmiştir. Optik hücredeki CO₂ miktarı arttıkça dedektör çıkışındaki sinyalde lineer azalma görülmektedir.



Şekil 4.3. 3. ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiş olan dedektör çıkış sinyali ile CO₂ miktarının değişim grafiği

Şekil 3.14'de gösterilen 4. ölçüm sisteminin sonuçları Şekil 4.4'deki grafikte gösterilmiştir. Beklenildiği gibi CO₂ konsantrasyonuna bağlı lineer bir değişim elde edilmiştir. Optik hücredeki CO₂ miktarı arttıkça dedektör çıkışındaki sinyalde lineer azalma görülmektedir.



Şekil 4.4. 4. ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiş olan dedektör çıkış sinyali ile CO₂ miktarının değişim grafiği

Şekil 3.15'de gösterilen 5. ölçüm sisteminin sonuçları Şekil 4.5'deki grafikte gösterilmiştir. Beklenildiği gibi CO₂ konsantrasyonuna bağlı lineer bir değişim elde edilmiştir. Optik hücredeki CO₂ miktarı arttıkça dedektör çıkışındaki sinyalde lineer azalma görülmektedir.



Şekil 4.5. 5. ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiş olan dedektör çıkış sinyali ile CO₂ miktarının değişim grafiği

Ve son olarak Şekil 3.16'da gösterilen 6. ölçüm sisteminin sonuçları ise Şekil 4.6'daki grafikte gösterilmiştir. Beklenildiği gibi CO₂ konsantrasyonuna bağlı lineer bir değişim elde edilmiştir. Optik hücredeki CO₂ miktarı arttıkça dedektör çıkışındaki sinyalde lineer azalma görülmektedir.



Şekil 4.6. 6. ölçüm sistemi kullanılarak elde edilmiş olan dedektör çıkış sinyali ile CO₂ miktarının değişim grafiği

Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında 1.ölçüm sisteminden alınan sonuç lineer azalmaya en yakın olduğu gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ

Optik gaz sensörleri eş zamanlı yanıt sağlar ve tespit edilmek istenen gaz türünü etkilemezler. Çünkü tespit edilmesi istenen gaz, sensörü oluşturan malzemelerle etkileşime girmediği için sensörleri etkilemez. Optik gaz sensörleri IR ışının belli bir dalga boyunda soğurulması olayına dayanarak çalışmaktadır. Optik gaz sensörleri son derece özeldir çünkü her gazın kendine has soğurulma çizgileri vardır.

Bu tez çalışmasında CO₂ gazının optik bir yöntem olan NDIR yöntemi kullanılarak ve çeşitli ölçüm sistemleri tasarlanarak tespit edilebildiği gösterilmiştir. Tüm ölçüm sonuçlarında beklenildiği üzere lineer bir değişim gözlenmiştir ve literatür ile uyuşmaktadır. Hamamatsu markasına ait T11722-01 termopil dedektörü ve halojen lamba kullanılarak yapılan ölçüm sisteminde ve referans içeren ölçümde elde edilen sonuçların lineere yakın ve daha hassas olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmalarda IR kaynak olarak halojen ampul ile monokromatör ve dedektör olarak ise termopil ile fotodedektör kullanılmıştır. IR kaynak olarak LED, dedektör olarak ise QWIP gibi elemanlar kullanılarak bu çalışmanın daha çok geliştirilebileceği ve literatüre katkı sağlanabileceği düşünülmektedir. LED'ler halojen ampullere göre düşük maliyetli, verimli ve hızlıdır. QWIP'ler ise belirli dalga boyu aralıklarını tespit edecek şekilde özelleştirilebilir, yüksek hassasiyet ve düşük gürültü seviyeleri sergileyerek zayıf IR sinyallerinin yüksek doğrulukla tespit edilmesini sağlar. Bu sebeple CO₂'nin en iyi şekilde tespit edildiği dalga boyu olan 4,3 µm'de LED ve QWIP kullanılarak bir ölçüm sistemi oluşturulursa daha hassas ölçüm sonuçları elde edilebileceği öngörülmektedir.

Optik ölçüm yöntemi diğer yöntemlere kıyasla yüksek gaz özgüllüğü, minimum sapma, hızlı yanıt ve uzun ömür sağlamaktadır. Ölçümler proses kontrolünde, yerinde ve gerçek zamanlı yapılabilir. Bu yöntem kullanılarak maden ve sanayi bölgelerindeki CH₄ ve CO gibi çeşitli zehirli gazların da tespiti sağlanabilir. Hem çalışanların can güvenliği hem de çevre kirliliğinin önüne geçilmesi açısından bu çalışmanın çok faydalı olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple yapılan bu tez çalışmasının maden ve sanayi sektörüne büyük bir katkısı olacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Admin. (2022, December 1). What is LED? Definition, Working, Properties, Uses, Advantages. BYJUS. https://byjus.com/physics/light-emitting-diode/
- Admin. (2023, March 28). Circuit components cell, switch, bulbs, connecting wires. BYJUS. https://byjus.com/physics/circuit-component/
- Bass, M., Mahajan, V. N., & Van Stryland, E. W. (2010). Handbook of Optics: Volume II Design, Fabrication, and Testing; Sources and Detectors; Radiometry and Photometry. McGraw-Hill Education. https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071498906
- Brenner, K., Hänsch, M. T., Kamiya, G. T., Krausz, T. F., Monemar, G. B., Venghaus, L. H., Weber, B. H., & Weinfurter, B. H. (2006). Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics.
- Briano, F. O. (2019). Mid-infrared photonic devices for on-chip optical gas sensing [Doctoral Thesis]. Royal Institute of Technology.
- Carbon dioxide (CO2) measurement using Non-Dispersive Infrared (NDIR) Spectroscopy with lead selenide (PbSe) photodetectors. (2020).
- Davies, A. M. C. (n.d.). An introduction to near infrared (NIR) spectroscopy | IM Publications Open. IMPublicationsOpen. Retrieved November 10, 2023, from https://www.impopen.com/introduction-near-infrared-nirspectroscopy#:~:text=The%20most%20important%20pioneer%20of,1000%20nm %20to%2016%2C000%20nm.
- Dong, M., Zhang, C., Ren, M., Albarracín, R., & Ye, R. (2017). Electrochemical and infrared absorption spectroscopy detection of SF6 decomposition products. Sensors (Switzerland), 17(11). https://doi.org/10.3390/s17112627
- Erduran, V., Bekmezci, M., Bayat, R., & Sen, F. (2022). Functionalized carbon materialbased electrochemical sensors for day-to-day applications. Functionalized Nanomaterial-Based Electrochemical Sensors: Principles, Fabrication Methods, and Applications, 97-111. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823788-5.00017-X
- Gas Sensors Types and mechanism | Tutorials | CO2 Sensors | Products | Asahi Kasei Microdevices (AKM). (n.d.). Tutorials | CO2 Sensors | Products | Asahi Kasei Microdevices (AKM). https://www.akm.com/eu/en/products/co2sensor/tutorial/types-mechanism
- Gerlach, G., Guth, H. U., & Oelßner, W. (2019). Carbon Dioxide Sensing: Fundamentals, Principles, and Applications. *Carbon Dioxide Sensing: Fundamentals, Principles, and Applications*, 1-422. https://doi.org/10.1002/9783527688302
- History of research on light | Photon terrace. (n.d.). Photon Terrace. Retrieved November 10, 2023, from https://photonterrace.net/en/photon/history/
- Hodgkinson, J., & Tatam, R. P. (2012). Optical gas sensing: a review. Measurement Science and Technology, 24(1), 012004. https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/1/012004
- Hui, R. (2020). Photodetectors. Introduction to Fiber-Optic Communications, 125-154. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805345-4.00004-4
- Jha, R. K. (2022). Non-Dispersive Infrared Gas Sensing Technology: A Review. IEEE Sensors Journal, 22(1), 6-15. https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3130034

- Jia, X., Roels, J., Baets, R., & Roelkens, G. (2019). On-Chip Non-Dispersive Infrared CO2 Sensor Based on an Integrating Cylinder †. Sensors 2019, Vol. 19, Page 4260, 19(19), 4260. https://doi.org/10.3390/S19194260
- Jing, Y., Yuhua, C., Yupeng, Y., Xiaofei, L., Zuwei, Z., Ming, X., Dengpan, W., Jiangdong, M., Yong, M., & Yuzhe, Z. (2021). Design and optimization of an integrated MEMS gas chamber with high transmissivity. Digital Communications and Networks, 7(1), 82-91. https://doi.org/10.1016/j.dcan.2020.05.006
- Karf&Scoot. (2022, August 23). Gaz Algılama Teknolojileri 4 Katalitik Gaz Sensörü -Karf&Scoot. Karf&Scoot. https://www.karfandscoot.com/katalitik-gaz-sensorunedir-nasil-calisir/
- Kök, F., Belediyesi, G. B., Ve Şehircilik, İ., Başkanlığı, D., Planlama, K., & Müdürlüğü,
 Ş. (2020). Yangında Açığa Çıkan Gazların, İnsan Sağlığına Vereceği Zararın Engellenmesi. Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi.
- Krebs, P., & Grisel, A. (1993). A low power integrated catalytic gas sensor. Sensors and Actuators B: Chemical, 13(1-3), 155-158. https://doi.org/10.1016/0925-4005(93)85349-F
- Lackner, M. (2007). TUNABLE DIODE LASER ABSORPTION SPECTROSCOPY (TOLAS) IN THE PROCESS INDUSTRIES-A REVIEW. Reviews in Chemical Engineering, 23(2).
- Lan J. (2018, October 8). LED types. https://ceruleanled.com/2018/10/08/led-types/
- Lee, R., & Kester, W. (2016). AD 50-10, October 2016.
- Malzeme Analiz Yöntemleri: 6. Hafta Titreşim Spektroskopisi. (t.y.). Geliş tarihi 10 Ocak 2024, gönderen

https://acikders.ankara.edu.tr/mod/resource/view.php?id=51923&forceview=1

- Mayrwöger, J., Hauer, P., Reichl, W., Schwodiauer, R., Krutzler, C., & Jakoby, B. (2010). Modeling of infrared gas sensors using a ray tracing approach. IEEE Sensors Journal, 10(11), 1691-1698. <u>https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2046033</u>
- Mesa, E. (t.y.). An Encounter with Light Generating Devices.
- Mirzaei, A., Hashemi, B., & Janghorban, K. (2016). α-Fe2O3 based nanomaterials as gas sensors. Içinde Journal of Materials Science: Materials in Electronics (C. 27, Sayı 4, ss. 3109-3144). Springer New York LLC. https://doi.org/10.1007/s10854-015-4200-z
- Neri, G. (2015). First fifty years of chemoresistive gas sensors. Içinde Chemosensors (C. 3, Sayı 1). MDPI. https://doi.org/10.3390/chemosensors3010001
- Nernst lamp | Science Museum Group Collection. (n.d.). Retrieved November 17, 2023, from https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co42571/nernst-lamplamp
- Paschotta, R. (2023). Photodetectors an encyclopedia article. RP Photonics Encyclopedia. https://doi.org/10.61835/MKE
- Rieke, G. H. (2021). Detection of Light. Detection of Light. https://doi.org/10.1017/9781316407189
- Rogalski, A. (2012). History of infrared detectors. Opto-Electronics. https://doi.org/10.2478/s11772-012-0037-7
- Rothman, L. S., Gordon, I. E., Babikov, Y., Barbe, A., Chris Benner, D., Bernath, P. F., Birk, M., Bizzocchi, L., Boudon, V., Brown, L. R., Campargue, A., Chance, K., Cohen, E. A., Coudert, L. H., Devi, V. M., Drouin, B. J., Fayt, A., Flaud, J. M., Gamache, R. R., ... Wagner, G. (2013). The HITRAN2012 molecular spectroscopic

database. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 130, 4-50. https://doi.org/10.1016/J.JQSRT.2013.07.002

- Salehabadi, A., Enhessari, M., Ahmad, M. I., Ismail, N., & Gupta, B. D. (2023). Metal Chalcogenide Biosensors: Fundamentals and Applications. Metal Chalcogenide Biosensors: Fundamentals and Applications, 1-208. https://doi.org/10.1016/C2020-0-02071-2
- Sarola, J. (n.d.). Sir Frederick William Herschel, infrared light (IR) discoverer | NIRS Research. Retrieved November 10, 2023, from https://nirs-research.com/en/sirfrederick-william-herschel-discoverer-of-the-light-infraroja-2/
- Sklorz, A., Janßen, S., & Lang, W. (2012). Detection limit improvement for NDIR ethylene gas detectors using passive approaches. Sensors and Actuators B: Chemical, 175, 246-254. https://doi.org/10.1016/J.SNB.2012.09.085
- Tan, Q., Tang, L., Yang, M., Xue, C., Zhang, W., Liu, J., & Xiong, J. (2015). Three-gas detection system with IR optical sensor based on NDIR technology. Optics and Lasers in Engineering, 74, 103-108. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.05.007
- The working principle and application of semiconductor gas sensor. (2021, November 5). Rika Sensors. Retrieved May 3, 2023, from https://www.rikasensor.com/theworking-principle-and-application-of-semiconductor-gas-sensor.html
- Thermopile Sensor Physics. (n.d.). Retrieved December 25, 2023, from https://www.newport.com/n/thermopile-physics
- Warburton, P. R., Pagano, M. P., Hoover, R., Logman, M., Crytzer, K., & Warburton, Y. J. (1998). Amperometric Gas Sensor Response Times. Analytical Chemistry, 70(5), 998-1006. https://doi.org/10.1021/AC970644Y
- Wikipedia contributors. (2022, September 25). William Coblentz. Wikipedia.https://en.wikipedia.org/wiki/William_Coblentz#/media/File:Portrait_o f_Coblentz.jpg
- Wikipedia contributors. (2023, June 14). Electrochemical gas sensor. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Electrochemical_gas_sensor
- Wittstock, V., Scholz, L., Bierer, B., Perez, A. O., Wöllenstein, J., & Palzer, S. (2017).
 Design of a LED-based sensor for monitoring the lower explosion limit of methane.
 Sensors and Actuators, B: Chemical, 247, 930-939.
 https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.03.086

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Duygunur ÖZDEMİR
Doğum Yeri ve Tarihi	: 05.05.1997 Osmangazi/ BURSA
Yabancı Dil	: İngilizce
Eğitim Durumu	: Osmangazi Gazi Anadolu Lisesi (2011-2015)
Lise	: Uludağ Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği
Lisans	(2015-2020)
Çalıştığı Kurum/Kurumlar	: Marelli (2022- devam ediyor) : Linus Medikal ve Ses Teknolojileri (2021-2022)
İletişim (e-posta)	: dygozdmr5@gmail.com