

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SEZYUM (Cs) ATOMİK GAZI İLE MİKRODALGA VE
LAZER IŞINIMININ REZONANS ETKİLEŞİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik Mühendisi Osman ŞEN

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ahmet Y. TEŞNELİ

Haziran 2009

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SEZYUM (Cs) ATOMİK GAZI İLE MİKRODALGA VE
LAZER IŞINIMININ REZONANS ETKİLEŞİMİ**

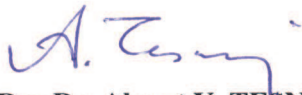
YÜKSEK LİSANS TEZİ

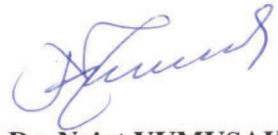
Elektronik Mühendisi Osman ŞEN

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Ahmet Y. TEŞNELİ

Bu tez 22 / 06 / 2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Osman ÇEREZCİ
Jüri Başkanı


Y. Doç. Dr. Ahmet Y. TEŞNELİ
Üye


Doç. Dr. Nejat YUMUŞAK
Üye

ÖNSÖZ

İzotropik prob kalibrasyonları çeşitli uluslararası standartlara göre yapılmaktadır. Ancak bu kalibrasyonlarda sürekli dalgalar (CW) kullanıldığından birçok modülasyonlu işaretlerin değerleri izotropik problemler ile ölçülememektedir. Bundan dolayı birçok çevresel ölçümlerde (Baz istasyonları, radar ölçümleri vb) doğru sonuçlar elde edilememektedir. Ayrıca ölçüm belirsizlikleri de yüksek olduğundan sonuçlar doğru olmamaktadır. Bu eksikliğin giderilebilmesi için, bu tez çalışmasında bu sinyalleri ölçümüne yönelik ve ölçüm belirsizliğini düşürmek için yeni bir kalibrasyon yöntemine giriş yapılmıştır.

Bu çalışmanın deneysel bölümleri, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) bünyesindeki Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde (UME) gerçekleştirilmiştir. UME, ülkemizde yapılan ölçümleri güvence altına alan ve bu ölçümlerin uluslararası sisteme entegrasyonunu sağlayan bir kurumdur.

Yüksek Lisans tezimin hazırlanması süresince her türlü yardım ve fedakarlığı gösteren, değerli fikirleriyle beni her zaman destekleyen, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım saygıdeğer hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Ahmet Yahya TEŞNELİ ve Sn. Doç. Dr. Ramiz HAMİD'e, laboratuvar çalışmaları sırasında her türlü konuda yardımlarını gördüğüm UME Elektromanyetik Metroloji Laboratuvarları EMC birimi çalışanları Sn. Dr. Mustafa ÇETİNTAŞ'a, Sn. Soydan ÇAKIR'a ve Sn. Savaş ACAK'a, tüm hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili AİLEME, en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
ELEKTROMANYETİK DALGALARIN ÖLÇÜM METODLARI.....	3
2.1. TEM hücresinde Kalibrasyon İşlemi.....	3
2.1.1. TEM hücresi.....	3
2.1.2. TEM hücresinde güç ölçümü.....	7
2.1.3. TEM hücresinde kalibrasyon.....	8
2.2. Tam Yansız Odada Kalibrasyon İşlemi.....	11
2.2.1. Antenlerde mutlak kazanç ölçümü.....	11
2.2.2. Tam yansız odada kalibrasyon.....	14
BÖLÜM 3.	
LAZER SOĞURUM SPEKTROSKOPİSİ.....	18
3.1. Lazerler.....	18
3.2.1. Lazer ışınının özellikleri.....	19
3.2. Lazer Türleri.....	20

3.2.1. Katı lazerler.....	20
3.2.2. Yarıiletken lazerler.....	21
3.2.3. Gaz lazerler.....	22
3.2.4. Kimyasal lazerler.....	23
3.2.5. Sıvı lazerler.....	23
3.3. Lazerin Çalışma Prensipleri.....	24
3.4. Doğal ve Uyarılmış Işıma.....	25
3.5. Diyot Lazerler.....	30
3.5.1. Diyot lazerler eşik akımı.....	33
3.5.2. Diyot lazerlerde akım – optik güç özellikleri.....	33
3.5.3. Diyot lazerlerde akım – voltaj özellikleri	34
3.6. Atomik Gazlarda Soğurum Spektroskopisi.....	35
BÖLÜM 4.	
DENEY DÜZENİĞİ.....	44
4.1. Optik Sistem.....	44
4.2. Mikrodalga Sistem.....	51
BÖLÜM 5.	
UYGULAMALAR VE SONUÇLAR.....	52
5.1. Cs Atomlarının D ₂ Enerji Geçişleri.....	53
5.2. Cs atomlarının D ₂ enerji geçişinde soğurum spektrumu.....	55
5.3. Uzak Alan Şartlarında Lazer – Atom – Mikrodalga Etkileşimi Sonucunda Gözlenen Radio – Optik Rezonans.....	59
BÖLÜM 6.	
TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ANSI	American National Standards Institute
AGF	Alçak geçiren filtre
ASTA	Açık saha test alanı
cm	Santimetre
Cs	Sezyum
dB	Desibel
dBm	Desibel olarak güç birimi
DC	Doğru akım
E	Elektrik alan
EM	Elektromanyetik
G	Gauss
GaAs	Galyum – Arsenik
GHz	Gigahertz
GSM	Global System for Mobile Communications
Hz	Hertz
He – Ne	Helyum – Neon
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
K	Kelvin
LED	Light emitting diode
m	Metre
mg	Miligram
MHz	Megahertz
mm	Milimetre
MW	Microwave
P_{fwd}	İletilen güç
P_{net}	Net güç

P_{rws}	Yansıyan güç
RF	Radio Frequency
PNA	Phase network analyser
TEM	Transverse electromagnetic
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UME	Ulusal Metroloji Enstitüsü
V/m	Volt/metre
W	Watt

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	TEM hücresi kesitleri.....	4
Şekil 2.2.	TEM hücresinin dıştan görünüşü.....	5
Şekil 2.3.	TEM hücresi karakteristik empedans ölçüm düzeneği.....	6
Şekil 2.4.	Tipik bir TEM hücresine ait karakteristik empedans ölçüm sonucu.....	6
Şekil 2.5.	TEM hücresinin boyutlara göre alan düzgünlüğü.....	7
Şekil 2.6.	Yönlü kuplörün ölçüm portları.....	8
Şekil 2.7.	TEM hücresinde yapılan kalibrasyon düzeneği blok şeması.....	9
Şekil 2.8.	IEEE 1309 standarına göre TEM hücresindeki kalibrasyon düzeneği.....	10
Şekil 2.9.	IEEE ANSI IEEE 149 üç anten yöntemi gösterimi.....	13
Şekil 2.10.	ANSI IEEE 149 standarına göre yarı yansız odada kalibrasyon düzeneği.....	13
Şekil 2.11.	Horn antendeki elektrik ve manyetik alan dağılımı.....	14
Şekil 2.12.	Tam yansız odada yapılan kalibrasyon düzeneği blok şeması.....	15
Şekil 2.13.	IEEE 1309 standarına göre tam yansız odadaki kalibrasyon düzeneği.....	16
Şekil 3.1.	Yakut pompalamalı lazerin yapısı.....	21
Şekil 3.2.	Yakut pompalamalı lazerlerin enerji seviyeleri.....	21
Şekil 3.3.	Yarı iletken diyot lazerin üstten görünüşü.....	22
Şekil 3.4.	Yarı iletken diyot lazerin önden görünüşü.....	22
Şekil 3.5.	Gaz lazer sistemi.....	23
Şekil 3.6.	Sıvı lazer sistemi.....	24
Şekil 3.7.	Basit bir lazer şeması.....	25
Şekil 3.8.	İki seviyeli bir atomik sistemde foton soğurulması.....	26

Şekil 3.9.	İki seviyeli bir atomik sistemde doğal ışınma.....	26
Şekil 3.10.	İki seviyeli bir atomik sistemde uyarılmış.....	27
Şekil 3.11.	Termal dengedeki durum için Boltzmann dağılımı.....	28
Şekil 3.12.	Termal dengede olmayan nüfus dağılımı – nüfus terslenmesi.....	29
Şekil 3.13.	Dört seviyeli sistem, He-Ne lazeri.....	30
Şekil 3.14.	Diyot lazerin optoelektronik çalışma prensibi.....	31
Şekil 3.15.	Işık gücünün akıma göre değişimi.....	32
Şekil 3.16.	Işık gücünün dalgaboyuna göre değişimi.....	32
Şekil 3.17.	Çeşitli uzunluklardaki diyot lazerinin akım-optik güç eğrileri.....	33
Şekil 3.18.	Diyot lazerinin akım-optik güç eğrisi.....	34
Şekil 3.19.	Diyot lazerinin akım-voltaj eğrisi.....	35
Şekil 3.20.	Cam küvet içindeki atomik gazla etkileşime giren lazer ışın demeti.....	35
Şekil 3.21.	Maxwell dağılımınca atom sayısının hızlarına göre değişimi.....	36
Şekil 3.22.	Elektromanyetik dalganın atom tarafından soğurumu.....	37
Şekil 3.23.	Atomlar tarafından soğrulan lazer ışık gücünün atomların hızlarına göre değişimi.....	38
Şekil 3.24.	Atom soğurum rezonansında hızından dolayı oluşan Doppler genişlemesi.....	39
Şekil 3.25.	Alt – Doppler doyum rezonanslarının gözlenmesi için kurulmuş deney düzeneği blok şeması.....	40
Şekil 3.26.	Doppler soğurum spektroskopisi üzerinde bir lazer demetiyle elde edilen çökme.....	41
Şekil 3.27.	Doppler soğurum spektroskopisinde rezonans frekansta ($\omega = \omega_0$) oluşan Lamb çukuru.....	42
Şekil 4.1.	Deney düzeneği blok şeması.....	44
Şekil 4.2.	Lazer – atom – mikrodalga etkileşimi deney düzeneği blok şeması.....	45

Şekil 4.3.	Yarı yansız odada deneysel Cs küveti deney düzeneği.....	46
Şekil 4.4.	Oda dışında kurulan referans Cs küveti deney düzeneği.....	46
Şekil 4.5.	Oda dışında ölçüm için kurulan deney düzeneği.....	47
Şekil 4.6.	Cs küvetinin blok şeması.....	50
Şekil 4.7.	Cs küveti.....	50
Şekil 4.8.	Mikrodalga sistemi deney düzeneği blok şeması.....	51
Şekil 5.1.	Cs atomunun enerji geçiş şeması.....	53
Şekil 5.2.	Cs atomunun enerji geçiş şeması Zeeman ayrışmalarının aşırı ince geçişleri.....	55
Şekil 5.3.	Cs küvetinde oluşan Doppler çökmeleri (a) Referans Cs küveti, (b) Deneysel Cs küveti.....	57
Şekil 5.4.	Cs hücresinin boyutlarına göre DROR sinyaline ait spektrum (a) 50 mm, (b) 20 mm, (c) 3mm.....	60
Şekil 5.5.	Farklı boyutlardaki Cs hücrelerinin DROR varyasyonu.....	61
Şekil 5.6.	Manyetik alan altında Zeeman spektrumları (a) < 0.2 G, (b) 6.5 G, (c) 10.5 G.....	62

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. TEM hücresinde yapılan kalibrasyon işlemindeki belirsizlik bileşenleri	10
Tablo 2.2. Elektrik alan probuna ait kalibrasyon değerleri.....	16
Tablo 2.3. Tam yansız odada yapılan kalibrasyon işlemindeki belirsizlik bileşenleri.....	17

ÖZET

Anahtar kelimeler: İzotropik prob kalibrasyonu, TEM hücresi, Tam yansız oda, Lazer spektroskopisi, Cs (Sezyum)

Elektromanyetik dalgalar, teknolojinin gelişmesi ile birçok alanda yaygın olarak kullanılmaya başlanılmıştır. Bunun sonucunda bu dalgaların genliklerinin hassas olarak ölçülmesine ihtiyaç duyulmuştur. Günümüzde kullanılan izotropik alan problemlerinin kalibrasyonu IEEE 1309 standartına göre TEM hücresinde ve tam yansız odada yapılmaktadır. İzotropik alan problemleri, sürekli dalgaları (CW) ölçebilmekte ancak darbeleri (Pulse) ve modülasyonlu dalgaları doğru ölçememektedir. Bundan dolayı ortamdaki EM dalgaların gerçek değerleri tam olarak bilinmemektedir. Ayrıca bu cihazların kalibrasyonlarındaki ölçüm belirsizlik değeri 1 dB'den büyük olduğundan hassas sonuçlar elde edilememektedir.

Bu tez çalışmasında EM dalgaların algılanmasına ve zaman ölçeğinde hızlı değişiminin analizine yönelik lazer spektroskopi tekniğine dayalı yeni EM alan sensörü geliştirilmesi ile ilgili araştırma yapılmıştır. İçerisinde Cs atom gazı olan cam küvet içerisinde lazer - atom - mikrodalga alan etkileşimi sağlanarak dış mikrodalga alanın etkisi ile EM dalganın uzak alan şartlarında lazer soğurumundaki değişim gözlenmiş ve EM alan analizinde kullanılmıştır.

RESONANCE INTERACTION OF MICROWAVE AND LASER RADIATION WITH CESIUM (Cs) ATOMIC GAS

SUMMARY

Key Words: Isotropic Probe Calibrations, TEM Cell, Full Anechoic Chamber, Spectroscopy, Cesium (Cs)

Electromagnetic waves have begun to be utilized in various regions of science as the technology improves. As a consequence, More precise measurements of electromagnetic waves become an essential requirement. Nowadays, Used isotropic probes are calibrated in TEM Cells and in full anechoic chambers in accordance with the Standard IEEE 1309. Isotropic field probes can measure CW signals properly but fail to measure pulse modulated waves, therefore it is not possible to know the real value of an electromagnetic wave. In addition, since the measurement uncertainty is more than 1 dB in the current calibration systems, precise measurement results are not obtained.

In this thesis, researches for a new EM field sensor based on laser spectroscopy and analysis of changes of EM waves in time have been made. First of all, An interaction between laser, atom and microwave inside a lantern filled with Cs atom gas was realized, then laser absorption under the influence of an external EM wave was observed and this absorption was utilized in analysis of EM waves.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde EM (Elektromanyetik) dalgalar, 1×10^{-14} - 1×10^{-15} Hz frekans doğruluğunda üretilmekte ve ölçülebilmektedir. Böyle frekansı hassas dalgalar bilim ve teknolojinin farklı alanlarındaki (Haberleşme, tıp, metroloji vs.) uygulamalarda çok önemlidir.

Diğer taraftan EM dalgalar elektromanyetik uyumluluk, GSM ve radar haberleşmelerinde yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bu tür uygulamalarda EM dalganın genlik ölçümlerinin çok hassas bir şekilde yapılmasına gereksinim duyulmaktadır. Ancak halihazırda EM spektrumun RF (Radio frequency) – MW (Microwave) EM dalgaların üretimi ve genlik ölçümlerindeki belirsizlik, frekans ölçümlerinden farklı olarak 0.8 dB – 2.5 dB seviyesindedir. Ayrıca bu ölçümlerde kullanılan izotropik problemlerin geometrik boyutlarından dolayı EM alanın uzayda dağılım analizinde, darbeli sinyallerin algılanması ve analizinde ciddi zorluklar yaşanmaktadır. Log periyodik, bilog gibi antenlerin boyutlarından dolayı ölçümlerde yine sorun yaşanmaktadır. Her ne kadar izotropik problemlerin boyutları 5 cm – 10 cm civarında olsa bile bu tür problemler modülasyonlu (PM, AM, FM vb.) sinyalleri doğru ölçmemektedir. Günümüzde bu ölçümler yönlü antenler ile yapılmaktadır. Son yıllarda optik sensörler ile ilgili çalışmalar başlamıştır.

Rezonans lazer ve mikrodalga ışınlarının Cs ve Rb atomik gazı ile etkileşiminin araştırılması konusunda literatürde çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu tür çalışmaların büyük çoğunluğu lazer – atom – mikrodalga etkileşiminin, mikrodalga rezonatörü içerisinde yayılması ile ilgilidir. Bu radio – optik spektral rezonans, kullanılan mikrodalga kaynağı frekansının atomların enerji geçişinde kilitletmesinde ve atomik frekans standartı veya atomik saat yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak burada vurgulanması gereken çok önemli bir husus vardır. Mikrodalga rezonatörü içerisindeki lazer – atom – mikrodalga etkileşimi,

mikrodalğanın yakın alanında meydana gelmektedir. Yani atomların kaynaktan uzaklığı, mikrodalga boyunun çok altındadır [1, 2, 3].

Bu tez çalışmasında, ayrıntılı olarak ikinci bölümde izotropik problemlerin kalibrasyon yöntemleri, üçüncü bölümde lazerler ile ilgili genel çalışma prensipleri, lazer türleri, enerji geçişleri, atomik gazlarda soğurum spektroskopisi, dördüncü bölümde deney düzenekleri, beşinci bölümde literatürde yer alan çalışmalar ve içerisinde Cs atom gazı olan cam küvet içerisinde lazer - atom – mikrodalga alan etkileşimi, uzak alan şartlarında lazer soğurumundaki değişimler ile ilgili deneysel sonuçlar, altıncı bölümde ise bu çalışmalar ile ilgili sonuçlar ve öneriler anlatılmıştır.

BÖLÜM 2. ELEKTROMANYETİK DALGALARIN ÖLÇÜM METODLARI

İzotropik problemlerin kalibrasyon işlemi, IEEE Std 1309 standartına göre 3 yöntem ile yapılmaktadır. Burada sadece birincil seviye hesaplanabilir alan kalibrasyon yöntemi anlatılacaktır. Bu kalibrasyon işlemi, TEM hücresi ve tam yansız odada yapılmaktadır.

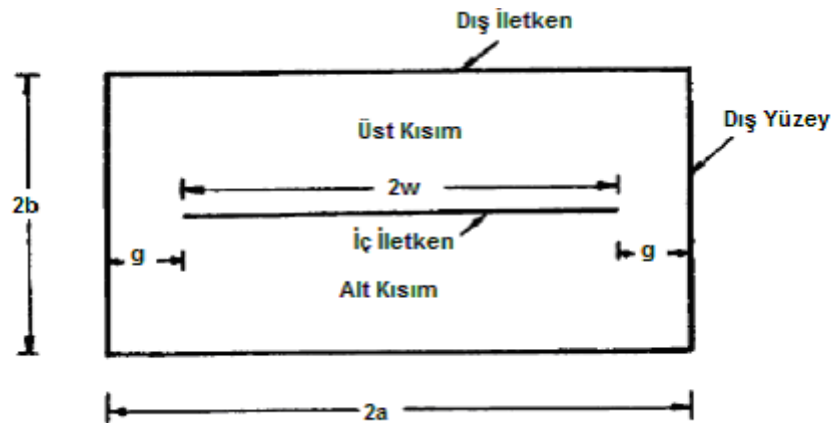
2.1. TEM Hücresinde Kalibrasyon İşlemi

2.1.1. TEM hücresi

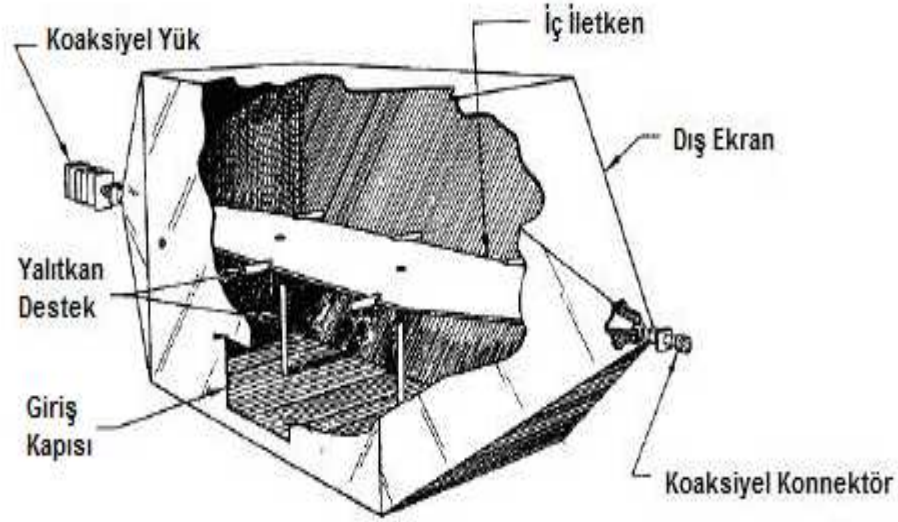
TEM hücreleri, insan sağlığı ve diğer cihazlar için tehlikeli ve zararlı olabilecek düzeyde dışarıya enerji yaymayan tamamen ekranlı cihazlardır. Diğer önemli avantajları kalibrasyon sisteminin uzun süre durağanlığı ve tam yansız odalarla karşılaştırıldığında oldukça maliyetlerinin düşük olmasıdır. Aslında basit bir TEM hücresi, TEM modunda çalışan iki iletkenli iletim hattının bir parçasıdır, bu nedenle ismini buradan alır. Şekil 2.1' de görüldüğü gibi TEM hücresinin ana bölümü, karesel dış bir iletken ile düz bir septumdan (merkez levha iletken) oluşmaktadır. Bu septum, alt ve üst duvarların tam ortasında yer almaktadır. TEM hücresinin ana bölümü ve daralan uçlarının boyutları öyle seçilmiştir ki hücrenin boyutu boyunca karakteristik empedansın (Z_0) 50Ω olması sağlanmıştır. TEM hücresi dizayn edilirken, eşitlik 2.1'deki büyüklükler kullanılarak karakteristik empedansın 50Ω olması sağlanır. Eşitlikteki büyüklükler şekil 2.1'de belirtilmiştir.

$$Z_0 = \frac{94.2}{\frac{w}{b} + \frac{2}{\pi} \ln \left[1 + \coth \left(\frac{\pi g}{2b} \right) \right]} \quad (2.1)$$

TEM hücresi uygun olarak dizayn edilip, uygun olarak yansıma oluşturmayacak bir yükü sonlandırıldığında, yüksek dereceli yayın modlarının kesim frekanslarından daha aşağı frekanslarda giriş VSWR değeri genellikle 1.5:1 değerinden küçük olmaktadır. Kalibrasyon yapılan bölgenin merkezinde, septum ile üst veya alt duvar arasında, E alanı dikey olarak polarize olmuş olup, oldukça düzgün dağılımlıdır. Aynı zamanda, dalga empedansı boşluktaki 377 Ω değerine oldukça yakındır. Prob kalibrasyonu sırasında, bu alana sokulan prob, alan dağılımını bir miktar bozacak olmasına karşın, eğer prob boyutları $b/3$ ' ten küçük ise alan şiddetindeki toplam belirsizlik 1 dB' den az olacaktır. Burada b , septum ile üst duvar arasındaki mesafedir. TEM hücreleri çeşitli boyut ihtiyaçlarını içine alabilmek ve çeşitli frekans aralıklarını kapsayabilmek için çeşitli boyutlarda olabilmektedir. Fakat TEM hücresi içinde oluşacak yüksek dereceli yayınım modlarından kaçınmak için genişlik, bir yarım dalga boyundan küçük olmalıdır, buda TEM hücresi için maksimum kullanım frekansını yaklaşık 200 MHz' e sınırlamaktadır. (maksimum 75 cm boyutlarında bir TEM hücresi). Ancak 500 MHz'e kadar kalibrasyon yapılabilir. TEM hücreleri DC (0 Hz)' ye kadar kullanılabilir [4].



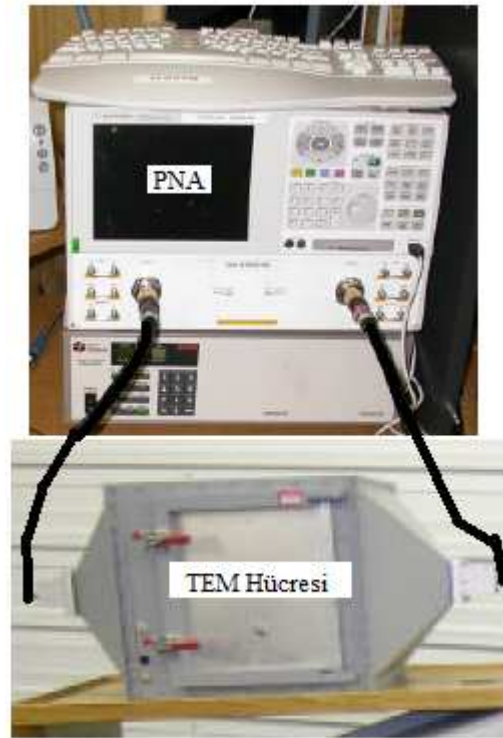
Şekil 2.1. TEM hücresi kesitleri



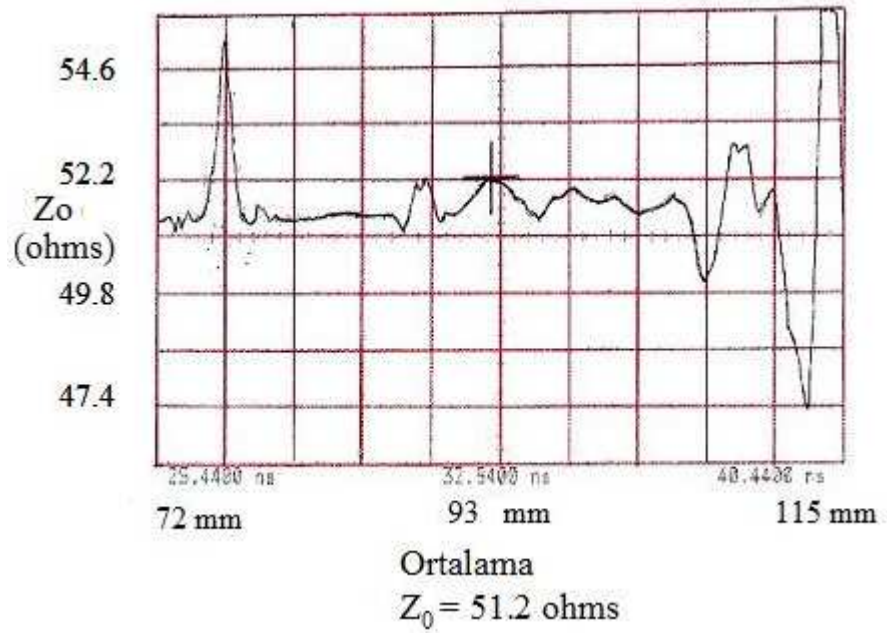
Şekil 2.2. TEM hücresinin dıştan görünüşü

TEM hücresinin karakteristik empedansı tipik olarak 50Ω verilir ancak bu empedans her frekans için 50Ω değildir ve bunun her frekansta ölçülmesi gerekmektedir. Genellikle bu işlem TEM hücresinin girişinden yapılmaktadır. Ancak bu durum bize karakteristik empedansı doğru olarak vermemektedir. Çünkü kalibrasyon işlemi TEM hücresinin orta noktasında yapılmaktadır. Bundan dolayı orta noktadaki empedansın bulunması gerekmektedir. Bu yüzden dalganın hızından hareketle TEM hücresinin orta noktasında belirli noktalar alınarak ortalama empedans bulunur. Bu işlem zaman domeninde PNA kullanılarak yapılır. Şekil 2.3'te karakteristik empedans ölçüm düzeneği verilmiştir. Şekil 2.4'de bu yönteme göre ölçülmüş tipik bir karakteristik empedans ölçüm sonucu görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi TEM hücresinin giriş ve çıkışındaki empedansın 50Ω 'dan çok farklı olduğu görülmektedir. Ancak merkezinde karakteristik empedansın ortalaması 51.2Ω olarak ölçülmüştür. Yatay eksendeki boyutlar TEM hücresinin boyutunu göstermektedir.

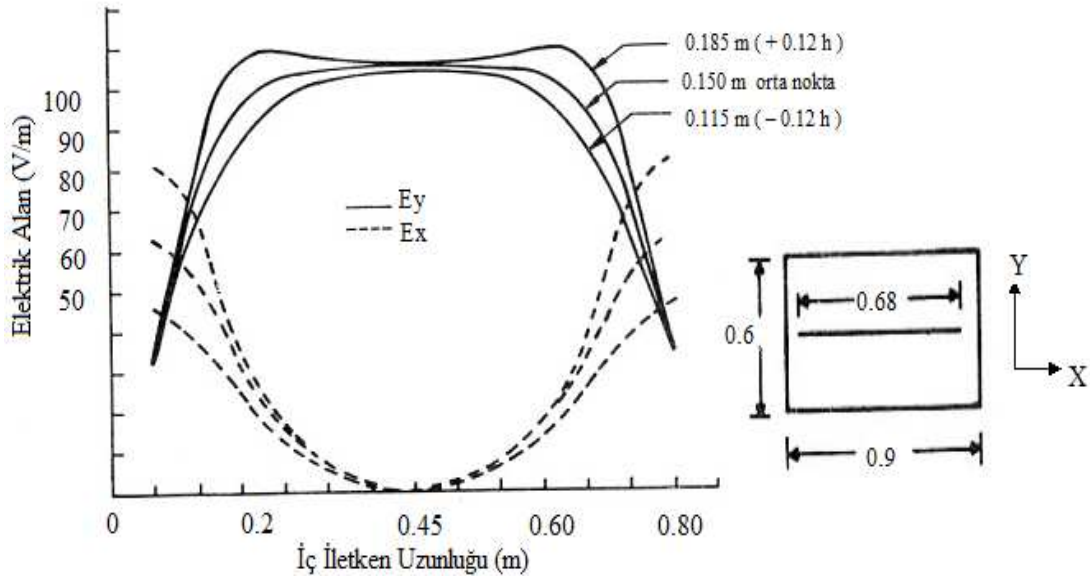
Ayrıca alan düzgünlüğünde (TEM hücresi uyumlu bir yük ile sonlandırıldığında) şekil 2.5'deki gibi TEM hücresinin merkezinde bu alanın oluşturulacağı anlaşılmaktadır [5].



Şekil 2.3. TEM hücresi karakteristik empedans ölçüm düzeneği



Şekil 2.4. Tipik bir TEM hücreğine ait karakteristik empedans ölçüm sonucu



Şekil 2.5. TEM hücresinin boyutlara göre alan düzgünlüğü

2.1.2. TEM hücresinde güç ölçümü

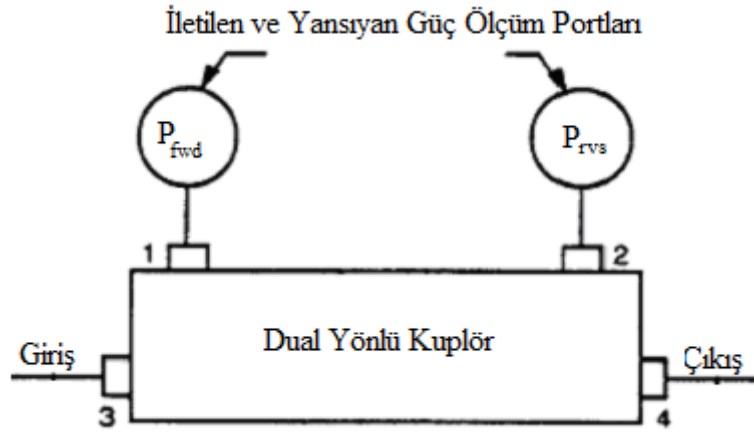
TEM hücresi girişindeki gücü ölçmek için yönlü kupleör kullanılır. Yönlü kupleörün ileri ve yansıyan portları güç sensörleri aracılığıyla güç ölçere bağlanarak net güç ölçülür. Ölçümler sırasında P_{fwd} ve P_{rvs} ölçümleri güç sensör ve güç metre kullanılarak yapıldığı için sonuçlar dBm biriminde elde edilmektedir. Net gücü bulmak için eşitlik 2.2, eşitlik 2.3 ve eşitlik 2.4 kullanılır.

50 Ω ' luk bir ölçüm alıcısı için,

$$P_{fwd} (W) = \frac{10^{[P_{fwd} (dBm)/10]}}{10^3} \quad (2.2)$$

$$P_{rvs} (W) = \frac{10^{[P_{rvs} (dBm)/10]}}{10^3} \quad (2.3)$$

$$P_{net} (W) = P_{fwd} (W) - P_{rvs} (W) \quad (2.4)$$



Şekil 2.6. Yönlü kuplörün ölçüm portları

2.1.3. TEM hücresinde kalibrasyon

TEM hücresindeki kalibrasyon işlemi, DC – 500 MHz frekans aralığında şekil 2.7'deki gibi yapılmaktadır. İlk olarak sinyal kaynağından herhangi bir frekansta ve belirli genlikte sinüzoidal bir işaret uygulanır. Bu işaret RF kuvvetlendiricide belirli oranda yükseltilir. Genliği yükseltilmiş olan sinyal alçak geçiren filtreden geçirilerek uygulanan işaretin harmonikleri belirli oranda zayıflatılır. TEM hücresinin girişindeki net güç değeri ölçülür. TEM hücresinin diğer portu yük ve empedans uyumluluğu için zayıflatıcı ile sonlandırılarak geriye yansıma ortadan kaldırılır.

TEM hücresinin üst yada alt septumundaki teorik elektrik alan değeri eşitlik 2.5'e göre bulunur. Daha sonra orta noktaya kalibrasyonu yapılacak olan izotropik prob yerleştirilerek probun göstermiş olduğu değer, eşitlik 2.6'daki gibi teorik elektrik alan değerine bölünerek düzeltme faktörü elde edilir. Ayrıca düzeltme faktörü, eşitlik 2.7 kullanılarak dB olarak elde edilir. Bu işlem istenilen frekanslarda tekrarlanarak izotropik probun frekans cevabı bulunur.

$$E = \frac{V}{b} = \frac{\sqrt{P_{net} \cdot Z_o}}{b} \quad V/m \quad (2.5)$$

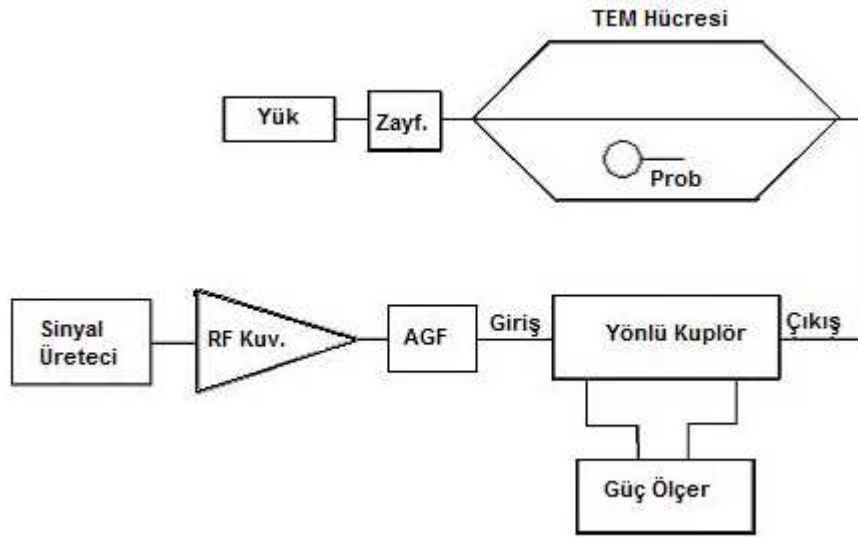
$$\text{Düzeltilme Faktörü} = \frac{\text{Teorik Elektrik Alan}}{\text{Okunan Elektrik Alan}} \quad (2.6)$$

$$\text{Düzeltilme Faktörü (dB)} = 20 \times \text{Log (Düzeltilme Faktörü)} \quad (2.7)$$

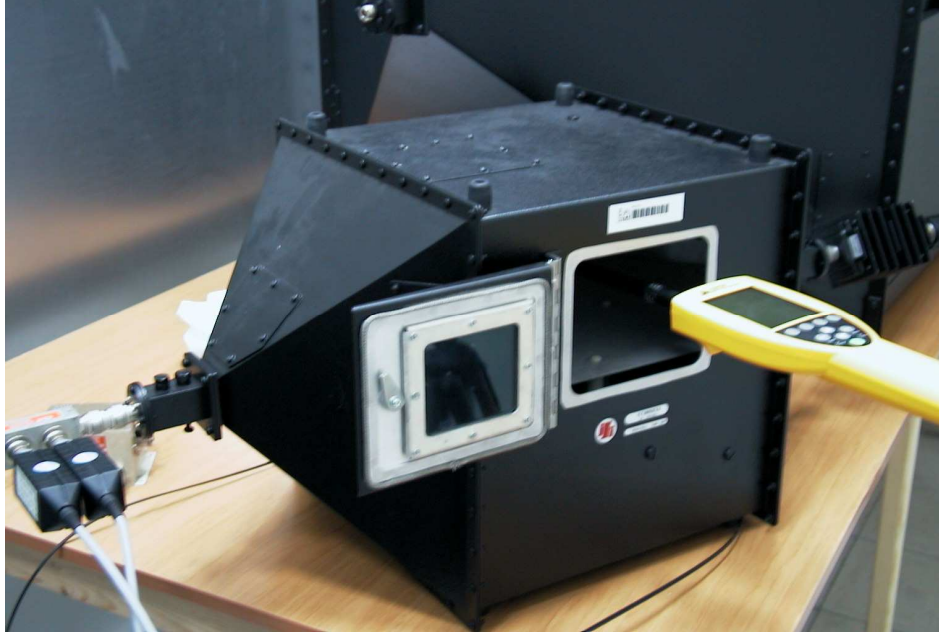
Z_0 : TEM hücresinin orta noktasındaki karakteristik empedansı (Ω)

P_{net} : TEM hücresinin girişindeki net güç (W)

b : TEM hücresinin plakalar arasındaki mesafe (m)



Şekil 2.7. TEM hücresinde yapılan kalibrasyon düzeneği blok şeması



Şekil 2.8. IEEE 1309 standartına göre TEM hücreindeki kalibrasyon düzeneği (TÜBİTAK UME' de yapılan bir kalibrasyondan alınmıştır.)

Tablo 2.1. TEM hücresinde yapılan kalibrasyon işlemindeki belirsizlik bileşenleri

Bileşen Sembölü	Bileşen Adı	Birimi	Açıklama
E	Elektrik Alan	V/m	Bu ölçülen değerdir, yani sonuçtur
$U_{\text{Pow.met.}}$	Güç Metre	dB	Güç metrenin ölçmesinden kaynaklanan hata.
$U_{\text{Pow.sen.}}$	Güç Sensörü	dB	Güç sensörünün ölçmesinden kaynaklanan hata
U_{TEMZ_0}	TEM Hücresi Empedansı	dB	TEM hücresinin karakteristik empedansının 50 ohm olmamasından kaynaklanan hata
$U_{\text{dist.}}$	Mesafe	dB	TEM hücresinin septum mesafesinden kaynaklanan hata
U_{mismatch}	Empedans Uyumsuzluğu	dB	TEM hücresi ile güç sensörü arasındaki empedans uyumsuzluğundan kaynaklanan hata
$U_{\text{Pos. error}}$	Pozisyon Hatası	dB	Probun TEM hücresinin orta noktasına konumlandırılmamasından kaynaklanan hata
U_{kup}	Yönlü Kuplör	dB	Yönlü kuplörün ölçmesinden kaynaklanan hata
U_{TEM}	TEM Hücresi	dB	TEM hücresindeki alanın ideal olmamasından kaynaklanan hata
U_{Prob}	Prob	dB	Kalibrasyon esnasında probun TEM hücresindeki ideal alanı bozmasından kaynaklanan hata.
$U_{\text{Inst.}}$	Tekrarlanabilirlik	dB	Cihazın ölçmesinden kaynaklanan hata.

Tablo 2.1’de yer alan veriler, TEM hücresinde yapılan kalibrasyonlardaki belirsizlik değerlerine ait bileşenlerdir. Herbir cihaza ait belirsizlik değerleri, cihazların kalibrasyon sertifikalarından temin edilir. Toplam belirsizlik bileşen aşağıda verilen eşitlikten bulunur.

$$E = U_{\text{Pow.met.}} + U_{\text{Pow.sen.}} + U_{\text{TEMZo}} + U_{\text{dist.}} + U_{\text{mismatch}} + U_{\text{Pos. error}} + U_{\text{kup.}} + U_{\text{TEM.}} + U_{\text{Prob}} + U_{\text{rept.}}$$

2.2 Tam Yansız Odada Kalibrasyon İşlemi

Tam yansız odadaki kalibrasyon işlemi için ortamın uzak alan şartlarını sağlaması gerekmektedir. Ayrıca ortam serbest uzay şartlarına çok yakın olmalıdır. Bunu sağlamak için duvarın, tavanın ve yerin mutlaka yutucu yada soğurucu malzemeler ile kaplanması zorunludur. Alternatif olarak bu işlem ASTA (Açık saha test alanı)’da yapılabilir. Ancak ortamın arka plan gürültüsü çok düşük seviyelerde olmalıdır. Bu şartlar sağlanmazsa ölçüm doğru olmayacaktır. Bundan dolayı tam yansız odalara ihtiyaç duyulmaktadır. Ekranlama etkinliklerin 90 dB’den büyük olması halinde tam yansız odalarda yapılabilir.

2.2.1. Antenlerin mutlak kazanç ölçümü

Kalibrasyonda kullanılacak antenlerin mutlak kazançlarının ölçülmesi gerekmektedir. Mutlak kazancı bulunmak istenen antenler şekil 2.9’da görüldüğü gibi yatay polarizasyonda gerçekleştirilir. Yatay polarizasyonda yapılmasının sebebi ise ölçümün saha değişimlerine daha duyarsız olmasını sağlayacaktır. Her bir antenin mutlak kazancının tespiti için üç ölçüm yapılmalıdır. Her bir ölçümde bir anten çifti için ölçüm alınır. Antenler sırasıyla “a”, “b” ve “c” olarak adlandırılır. Ölçümler sırasıyla “a-b”, “a-c” ve “b-c” çiftleri olarak gerçekleştirilir. Ölçümler sonucunda eşitlik 2.8, eşitlik 2.9 ve eşitlik 2.10’daki gibi üç adet denklem elde edilir. Bu yöntem laboratuvar ortamında 500 MHz ve üstü frekanslar için uygundur. Antenlerin metal zeminden en az 3 m’ de yükseklikte olması yada metal zeminin elektromanyetik yutucu malzemeler ile kaplanması aralarındaki yerden yansımaları en aza

indirecektir. Verici antenler hangi mesafede kullanılacaksa, antenlerin kalibrasyon işlemleride o mesafede yapılarak antenlerin mutlak kazançları bulunmalıdır.

İlgili eşitlikler,

(a-b anten çifti için)

$$(G_a)_{dB} + (G_b)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rb}}{P_{ta}}\right) \quad (2.8)$$

(a-c anten çifti için)

$$(G_a)_{dB} + (G_c)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{ta}}\right) \quad (2.9)$$

(b-c anten çifti için)

$$(G_b)_{dB} + (G_c)_{dB} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{P_{rc}}{P_{tb}}\right) \quad (2.10)$$

P_{ta}, P_{tb} : Sırasıyla Anten 1 ve Anten 2' nin girişlerinde ölçülen güçtür ve deneysel olarak bilinmektedir.

P_{rb}, P_{rc} : Sırasıyla Anten 2 ve Anten 3' ün çıkışlarında ölçülen güçtür ve deneysel olarak bilinmektedir.

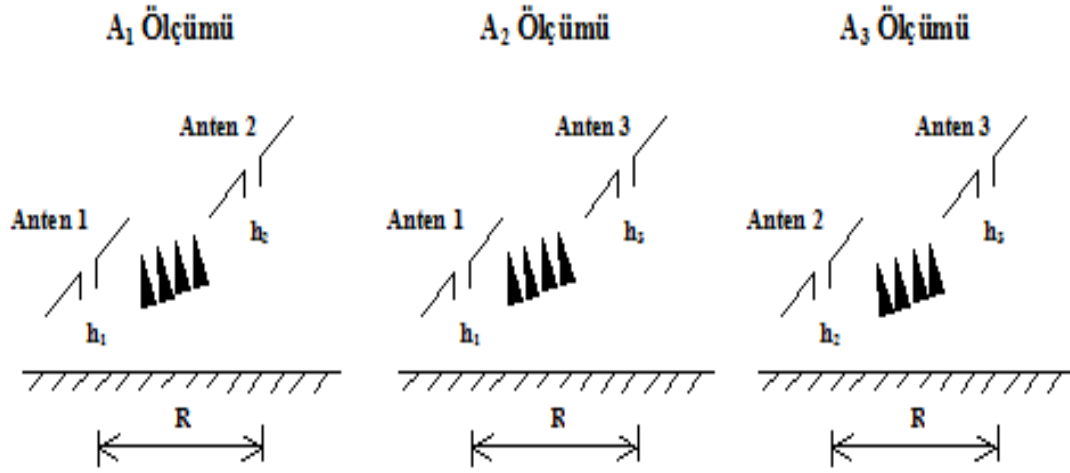
R : Ölçümler sırasında antenler arası mesafedir ve deneysel olarak bilinmektedir.

λ : Dalga boyu ve deneysel olarak bilinmektedir.

Eşitlik 2.8, eşitlik 2.9 ve eşitlik 2.10'dan antenlerin kazançları bulunmuş olur. Daha sonra bulunan anten faktörleri eşitlik 2.11'de yerine konularak antenin mutlak kazancı dB olarak, 2.12'de nümerik olarak elde edilmiş olunur [6].

$$G_o(dB) = 20\log(f_{MHz}) - AF(dB) - 29.79 \quad (2.11)$$

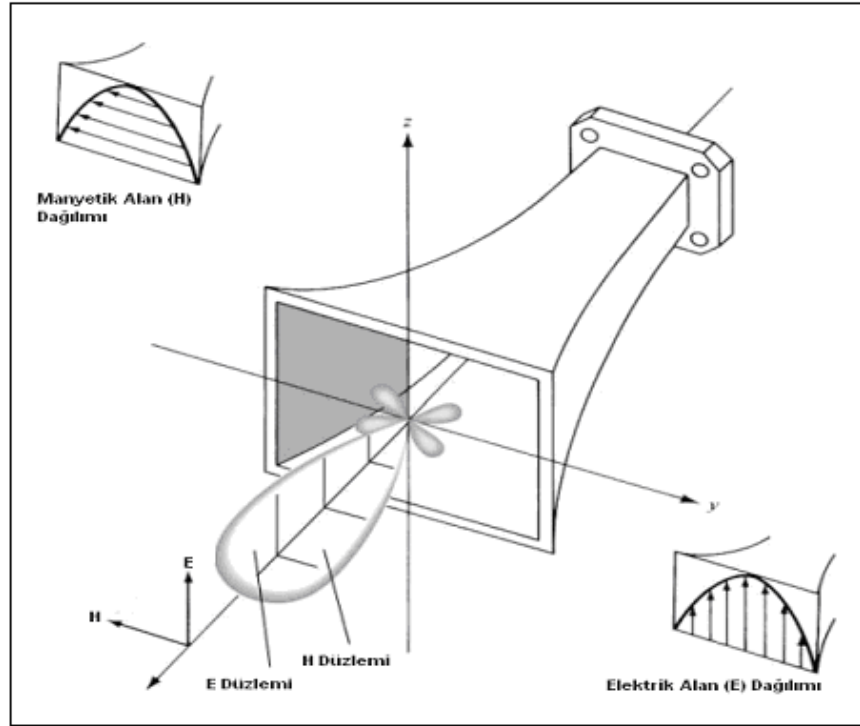
$$g(\text{birimsiz}) = 10^{[G_o(dB)/10]} \quad (2.12)$$



Şekil 2.9. IEEE ANSI IEEE 149 üç anten yöntemi gösterimi



Şekil 2.10. ANSI IEEE 149 standardına göre yarı yansız odada kalibrasyon düzeneği (TÜBİTAK UME' de yapılan bir kalibrasyondan alınmıştır.)



Şekil 2.11. Horn antendeki elektrik ve manyetik alan dağılımı

2.2.2. Tam yansız odada kalibrasyon

Tam yansız odadaki kalibrasyon işlemi ise 500 MHz – 40 GHz aralığında yapılmaktadır. İzotropik prob ile verici anten arasındaki mesafe genellikle 1,5 m – 2 m arasında seçilir. Verici olarak kullanılan antenler dar bantlı olmalı ve kazançları sabit olmalıdır. Böylece interpolasyon hatası minimize edilir. Ayrıca düşük güçler ile yüksek elektrik alanlar oluşturulur. Antenin yönlendiriciliğine de dikkat edilmelidir. Şekil 2.12’de verilen kalibrasyon düzeneği kurulur. Sinyal kaynağından herhangi bir frekansta ve belirli genlikte sinüzoidal bir işaret uygulanır. Bu işaret RF geçiren filtreden geçirilerek uygulanan işaretin harmonikleri belirli oranda zayıflatılır. Alçak geçiren filtre çıkışı yönlü kabloların girişine uygulanır. Yönlü kabloların çıkışındaki işaret verici antenin girişine uygulanır. Anten girişindeki gücü ölçmek için yönlü kablolar kullanılır. Yönlü kabloların ileri ve yansıyan portları güç sensörleri aracılığıyla güç ölçerlere bağlanarak net güç ölçülür. Verici antenden belirli bir mesafedeki (1,5 m – 2 m) teorik elektrik alan eşitlik 2.13 kullanılarak elde edilir. Daha sonra o mesafeye

kalibrasyonu yapılacak olan izotropik prob yerleştirilerek probun göstermiş olduğu değer, eşitlik 2.6'daki gibi teorik elektrik alan değerine bölünerek düzeltme faktörü elde edilir. Ayrıca düzeltme faktörü, eşitlik 2.7 kullanılarak dB olarakta elde edilir. Bu işlem istenilen frekanslarda tekrarlanarak izotropik probun frekans cevabı bulunur.

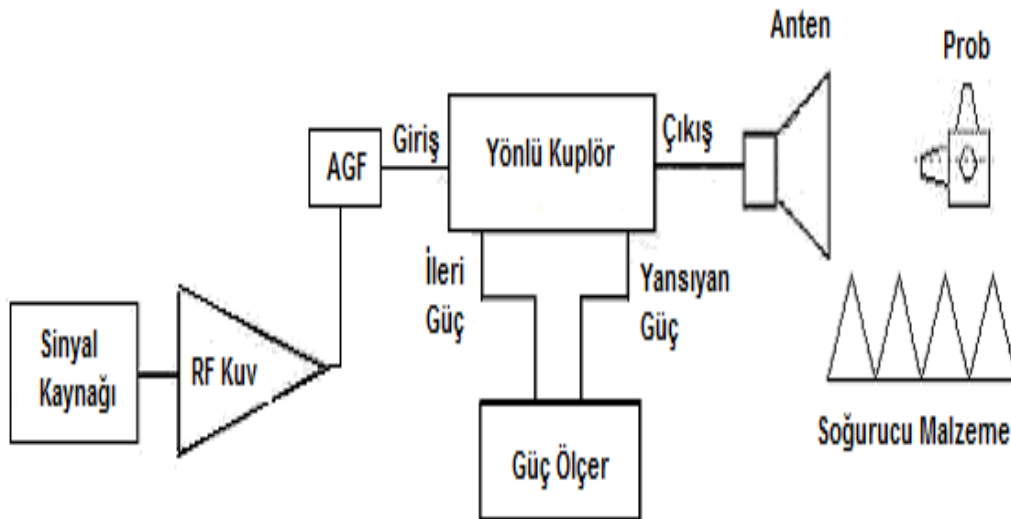
$$E = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{\eta_0 P_{net} g}{4\pi}} \quad V/m \quad (2.13)$$

η_0 : Ortamın karakteristik empedansı (377 Ω)

P_{net} : Anten girişindeki net güç (W)

g : Antenin nümerik olarak kazancı (birimsiz)

d : Verici anten ile prob arasındaki mesafe (m)



Şekil 2.12. Tam yansız odada yapılan kalibrasyon düzeneği blok şeması



Şekil 2.13. IEEE 1309 standardına göre tam yansısız odadaki kalibrasyon düzeneği (TÜBİTAK UME' de yapılan bir kalibrasyondan alınmıştır)

Tablo 2.2. Elektrik alan probuna ait kalibrasyon değerleri (TÜBİTAK UME' de yapılan bir kalibrasyondan alınmıştır)

Frekans (MHz)	Elektrik Alan Değerleri (V/m)		*Düzeltilme Faktörü (Linear)	Düzeltilme Faktörü (dB)
	Teorik Elektrik Alan	Probun Gösterdiği Elektrik Alan		
0,1	40,71	34,64	1,18	1,40
0,5	40,69	39,28	1,04	0,31
1	40,94	39,85	1,03	0,24
3	40,68	40,22	1,01	0,10
5	40,61	40,30	1,01	0,07
10	40,66	40,41	1,01	0,05
50	41,08	40,96	1,00	0,03
100	40,82	40,92	1,00	-0,02
200	41,03	38,88	1,06	0,47
300	41,43	44,85	0,92	-0,69
400	41,24	41,46	0,99	-0,05
500	40,80	34,36	1,19	1,49
600	40,47	41,27	0,98	-0,17
700	40,33	36,49	1,11	0,87
800	41,03	38,92	1,05	0,46
900	40,92	42,12	0,97	-0,25
1000	40,80	47,59	0,86	-1,34
1800	40,83	47,05	0,87	-1,23
2000	40,91	42,35	0,97	-0,30
2500	40,71	37,34	1,09	0,75
3000	40,99	28,23	1,45	3,24

*Elektromanyetik dalganın gerçek şiddet değeri, probta okunan değerin ilgili frekanstaki düzeltim faktörü çarpımı ile bulunur.

Tablo 2.3. Tam yansısız odada yapılan kalibrasyon işlemindeki belirsizlik bileşenleri

Bileşen Sembolü	Bileşen Adı	Birimi	Açıklama
E	Elektrik Alan	V/m	Bu ölçülen değerdir, yani sonuçtur
$U_{\text{Pow.met.}}$	Güç Metre	dB	Güç metrenin ölçmesinden kaynaklanan hata.
$U_{\text{Pow.sen.}}$	Güç Sensörü	dB	Güç sensörünün ölçmesinden kaynaklanan hata
U_{mismatch}	Empedans Uyumsuzluğu	dB	Yönlü kuplör ile horn anten arasındaki empedans uyumsuzluğundan kaynaklanan hata
U_{mismatch}	Empedans Uyumsuzluğu	dB	İleri güç ölçüm portundaki empedans uyumsuzluğundan kaynaklanan hata
U_{mismatch}	Empedans Uyumsuzluğu	dB	Yansıyan güç ölçüm portundaki empedans uyumsuzluğundan kaynaklanan hata
U_{mismatch}	Empedans Uyumsuzluğu	dB	Yönlü kuplör portundaki empedans uyumsuzluğundan kaynaklanan hata
$U_{\text{Spa.error}}$	Mesafe	dB	Prob ile horn anten arasındaki mesafeden kaynaklanan hata
$U_{\text{Algn.error}}$	Prob ile anten merkezi	dB	Prob ile anten faz merkezlerinin karşılıklı olmamasından kaynaklanan hata
U_{kup}	Yönlü Kuplör	dB	Yönlü kuplörün ölçmesinden kaynaklanan hata
$U_{\text{res.}}$	Yerden Yansıma	dB	Yerden yansılardan kaynaklanan hata
$U_{\text{flex.}}$	Kablo Bükülmeleri	dB	Kablo bükülmelerinden kaynaklanan hata
$U_{\text{ther.}}$	Kablo Isınmaları	dB	Kablo ısınmalarından kaynaklanan hata
$U_{\text{multp.}}$	Çeşitli Yansımalar	dB	Çeşitli yansılardan kaynaklanan hata
$U_{\text{Inst.}}$	Tekrarlanabilirlik	dB	Cihazın ölçmesinden kaynaklanan hata.

Tablo 2.3'de yer alan veriler, tam yansısız oda da yapılan kalibrasyonlardaki belirsizlik değerlerine ait bileşenlerdir. Herbir cihaza ait belirsizlik değerleri, cihazların kalibrasyon sertifikalarından temin edilir. Toplam belirsizlik bileşen aşağıda verilen eşitlikten bulunur.

$$E = U_{\text{Pow.met.}} + U_{\text{Pow.sen.}} + U_{\text{mismatch}} + U_{\text{mismatch}} + U_{\text{mismatch}} + U_{\text{mismatch}} + U_{\text{Spa.error}} + U_{\text{Algn.error}} + U_{\text{kup}} + U_{\text{res.}} + U_{\text{flex.}} + U_{\text{ther.}} + U_{\text{multp.}} + U_{\text{Inst.}} + U_{\text{rept.}}$$

BÖLÜM 3. LAZER SOĞURUM SPEKTROSKOPİSİ

3.1. Lazerler

Lazer; tek renkli, oldukça düz yoğun ve aynı fazlı paralel dalgalar halinde genliği yüksek güçlü bir ışık demetidir.

Lazer İngilizce de; Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (uyarılmış radyasyon salınımlarıyla ışığın kuvvetlendirilmesi) cümlesindeki kelimelerin baş harflerinin alınmasından türetilmiş bir kelimedir.

1960 senesinde ABD’de Theodore H. Maiman tarafından keşfedilmiştir. Normal ışık, dalga boyları muhtelif, rengarenk, yani farklı faz ve frekansa sahip dalgalardan meydana gelir. Lazer ışığı ise yüksek genlikli, aynı fazda, birbirine paralel, tek renkli, hemen hemen aynı frekanslı dalgalardan ibarettir. Optik frekans bölgesi yaklaşık olarak bir trilyon hertz ile üç bin trilyon hertz arasında yer alır. Bu bölge, kırmızı ötesi ışınları, görülebilen ışınları ve elektromanyetik spektrumun morötesi ışınlarını kapsar. Buna karşılık mikrodalga frekans bölgesi yaklaşık olarak 300 milyon hertzden 300 milyar hertze kadar uzanır. Yani, lazer çok yüksek frekanslarda çalışır.

Lazerin önemi uygulamasının yaygın olmasında ve onun daha da genişlemesinin beklenmesinde yatmaktadır. Özellikle uygulamanın genişliği, ışınların frekansların hassas bir şekilde kontrolünden, yayılan ışının yayılma düzeninden veya ışınların olağanüstü yoğunluğundan kaynaklanmaktadır. Lazer dolayısıyla, holografide, opektraskopide çok önemli gelişmeler ortaya çıkmıştır. Bunlar yoluyla lazer diğer bilimsel ve teknolojik alanlarda da etkisini göstermektedir.

Lazer ışınının normal ışıktan farkı şu şekilde açıklayabiliriz. Lazer ışını oluşturulan dalgalar tamamen birbirlerine paralel ilerlerler. Yani bir el feneri ve bir "laserpointer" (lazer feneri) ile bir duvar aydınlatılıp sonra yavaş yavaş arkaya doğru gidildiğinde, lazer ışınının normal ışıktan farkı kolayca seçilebilir. El fenerinin duvarda bıraktığı ışık lekesi, duvardan uzaklaştıkça büyür, lazerin aydınlattığı nokta ise hep aynı büyüklükte kalır. Lazer ışığı dağılmadığı için çok hassas işlemlerde rahatlıkla kullanılabilir. Cerrahlar, lazerle beyin ameliyatlarında küçük hücreleri dokulardan ayırabilirler.

3.1.1. Lazer ışının özellikleri

- Lazer ışınının en büyük özelliği dağılmaz olması ve yön verilebilmesidir. Bu özelliğinden faydalanılarak mesafe ölçme ve fiber optik teknolojisi geliştirilmiştir.
- Dalga boyunun küçük olması dağılmayı büyük ölçüde azaltır. Uyarılan atomlar her yön yerine belli yönlerde hareket ederler. Bu, lazerin çok parlak olmasını sağlar.
- Lazer ışınının tek bir ışın olarak dağılmadan yol alabilmesiyle haberleşmede iyi bir sinyal jeneratörü elde edilmiş olur ve aynı anda birçok bilgi bir yerden başka bir yere gönderilebilir.
- Lazer ışını dağılmaz olduğundan kısa darbeler halinde yayınlanabilmesi mümkündür. Kayıpsız yüksek enerji nakli yapılması bu özelliği ile sağlanabilir.
- Lazer ışını tek dalga boyuna sahip olduğu için lazer cinsine göre çeşitli renkte ışınlar elde etmek mümkündür.
- Lazer ışını herhangi bir ışık kaynağından daha yoğun ve şiddetlidir. Bazı lazerlerin şiddetine ulaşmak için bir cisim 1030 Kelvin'e kadar ısıtılmalı ki o yoğunlukta ışık yaysın. Bir lambadaki tungsten 3000 Kelvin, güneş ise yalnız 108 Kelvin sıcaklığındadır.

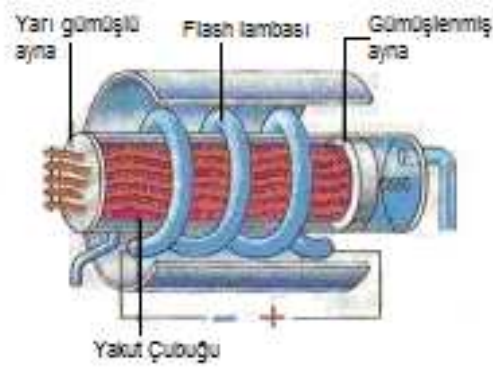
- Son derece düzgün bir ışıktır ve çok az sapar. Bir keresinde Dünyadan gönderilmiş olan lazer ışını Apollo 11'in Ay'a bıraktığı bir aynadan yansıyıp hiç sapmadan geri dönmüştür. Işığın bu seyahatinde aldığı yol 750.000 km idi.
- Lazer ışını keskin bir şekilde hedeflendirilebilir ama normal ışık her yöne dağılır; bu da demektir ki lazer ışını küçük bir yere büyük enerjiler verebilir ve böylece çok ince işler yapılabilir [7].

3.2. Lazer Türleri

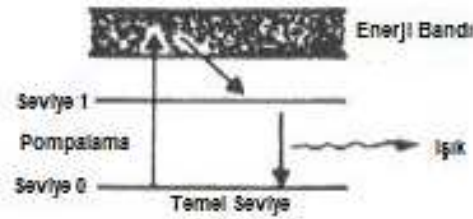
3.2.1. Katı lazerler

İlk bulunan lazer yakut lazeridir. Yakut, az miktarda krom ihtiva eden alüminyum oksit kristalidir. Kırmızı lazer ışınları yayan, bu kristal içindeki krom atomlarıdır. Krom atomları optik olarak yeşil ve mor ışıkla uyarılır. Bu tür lazer ile saniyenin milyarda biri gibi kısa bir sürede birkaç milyon wattlık güç nakledilebilir. Günümüzde kullanılan lazer, sert şeffaf kristalden meydana gelir. Kristalde küçük miktarda genellikle nadir toprak elementleri mevcuttur. Bu kristalin işlem için oda sıcaklığının çok altına indirilmesi gerekir. Bu lazerler optik pompalama gerektirirler ve darbeli olarak çalışarak ısınmayı önlerler. Sıcaklık ve manyetik alanda yapılacak değişikliklerle çalışma frekansı ayarlanabilir.

Katı lazerler nokta kaynağında, ölçme işlemlerinde elmas kalıpların işlenmesinde, atomik parçalanmada ve tıp alanında büyük kolaylık ve olanak sağlamaktadır.



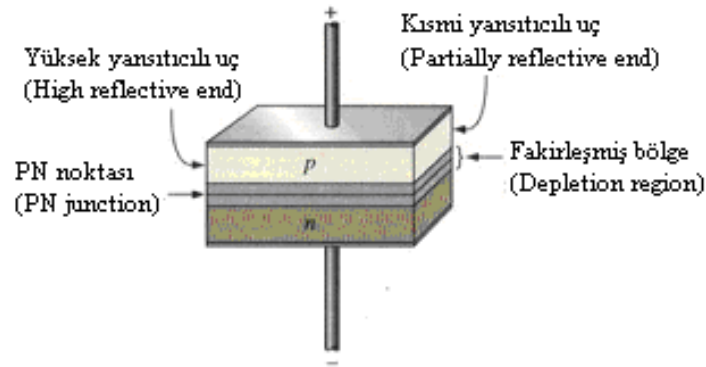
Şekil 3.1. Yakut pompalamalı lazerin yapısı



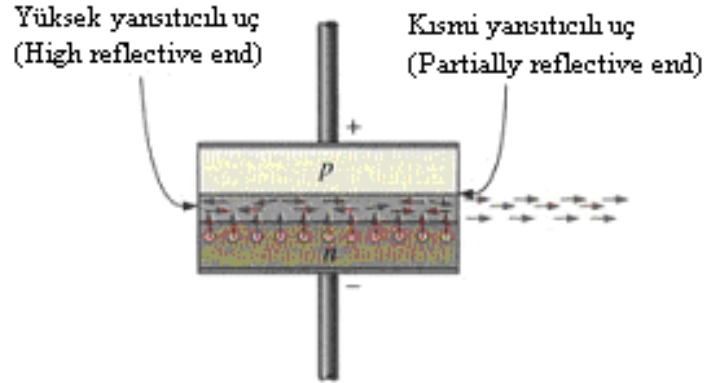
Şekil 3.2. Yakut pompalamalı lazerlerin enerji seviyeleri

3.2.2. Yarı iletken lazerler

Yarı iletken malzemelerden elde edilen kristallerle de lazer yapılmıştır. Galyum arsenik kristali yarı iletken lazere örnektir. Yarı iletken diyot gibi p-n malzemenin birleşmesinden meydana gelmiş olup, p-n malzemenin birleştiği yüzey yakut lazerindeki aynalar görevini yapar. Birleşim yüzeyinde pozitif voltaj p tarafına ve negatif voltaj n tarafına verildiği zaman elektronlar n malzemesinden p malzemesine geçerken enerjilerini kaybeder ve foton yayarlar. Bu fotonlar tekrar elektronlara çarparak bu elektronların daha çok foton üretmesine sebep olurlar. Neticede yeterli seviyeye ulaşan foton neşri, lazer ışını meydana getirmiş olur. Bu tür lazerler verimli ışık kaynaklarıdır. Genellikle boyları bir milimetreden büyük değildir. Ancak çok verimli çalışma için ortam sıcaklığı oda sıcaklığının çok altına düşürülmelidir.



Şekil 3.3. Yarı iletken diyot lazerin üstten görünüşü

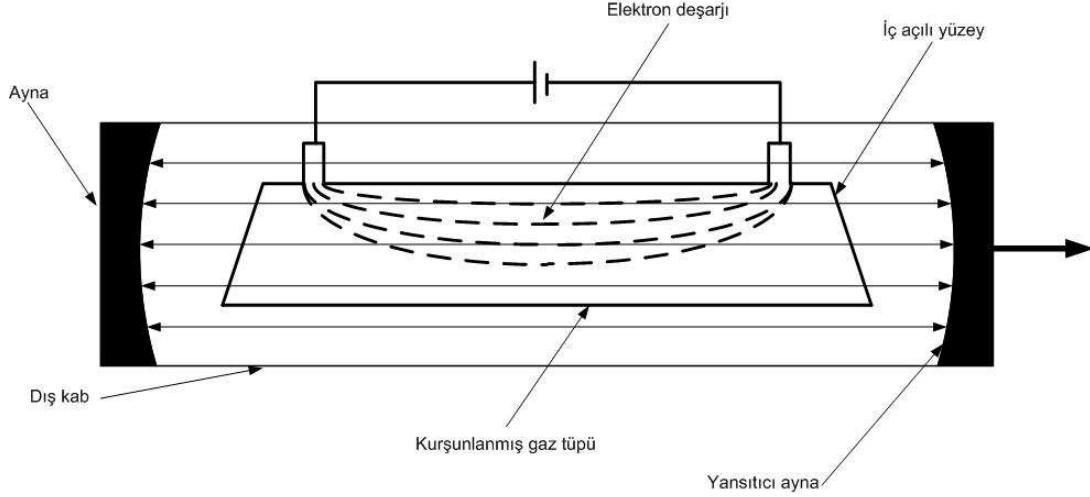


Şekil 3.4. Yarı iletken diyot lazerin önden görünüşü

3.2.3. Gaz lazerler

İlk gaz lazer helyum ve neon karışımı şeklinde kullanılmıştır. Bu karışım uzun bir tüpe ve iki küresel ayna arasına yerleştirilmiştir. Helyum ve neon gazı ile çalışan lazerde bu gazlar yüksek voltaj altında iyonize hale gelir. Helyum atomları elektrik deşarjı esnasında elektronların çarpması ile uyarılarak yüksek enerji seviyelerine çıkar. Bunlar, kazandıkları enerjilerini neon atomlarındaki eş enerji seviyelerine aktarırlar. Bu enerji aktarma işlemi fotonun yayılmasına sebep olur. Aynalar vasıtasıyla yeterli seviyeye ulaştıktan sonra lazer ışını elde edilmiş olur. Bu tür lazer ışınının dalga boyu 1,15 mikrondur.

Günümüzde CO₂ lazeri deri, lastik gibi organik malzemelerin kesilme işlerinde, delinmesinde zımba preslerinde tercih edilirler.



Şekil 3.5. Gaz lazer sistemi

3.2.4. Kimyasal lazerler

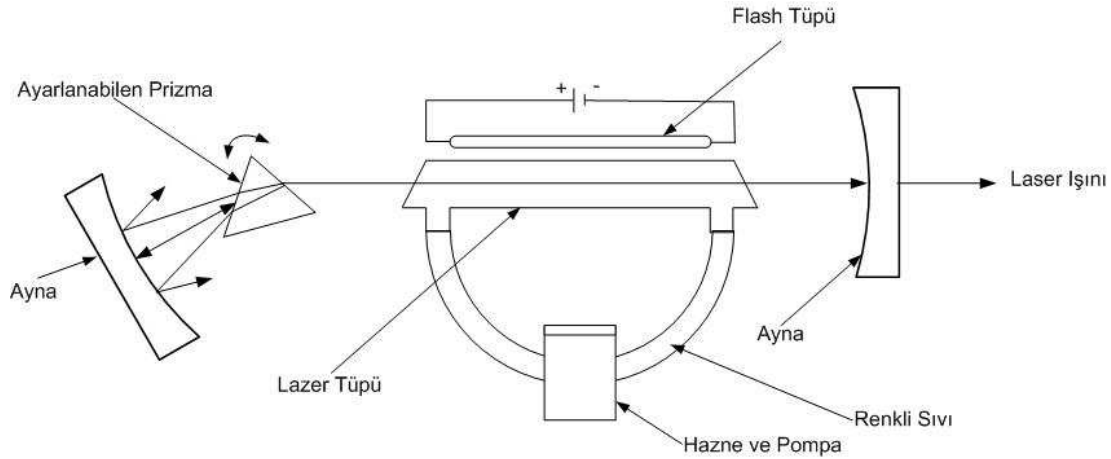
Kimyasal lazerlerde bir gaz meydana getirilir ve kimyasal reaksiyon yoluyla pompalanır. Kimyasal pompalama bir ekzotermik kimya reaksiyonunda enerji açığa çıkmasıyla olur.

Ayarlanabilen prizma aracılığıyla, ayarlanan prizma açısına göre değişik renk ve dalga boyları elde edilir. Kimyasal lazerler, ayarlanabilen prizması nedeniyle özellikle kimyasal analiz işlemleri için uygundur. Ayrıca spektroskopi, holografi ve biomedikal uygulamalarda da kullanılır.

3.2.5. Sıvı lazerler

En çok kullanılan sıvı lazer türü, organik bir çözücü içindeki organik boyanın seyreltik bir çözeltisidir. Bunlara mor ötesine yakın ve kızılötesine yakın arasında lazer türleri elde edilebilir. Genellikle pompalama optik olarak cereyan eder. Birkaç lazer paralel olarak çalıştırılabilir. Böylece saniyenin birkaç trilyonda biri devam eden lazer darbeleri elde edilebilir. Boya lazerlerinin en önemli özelliği dalga

boyunun geniş bir alanda hassas bir şekilde ayarlanabilmesidir. Sıvı lazerleri, ayarlanabilen prizması nedeniyle özellikle kimyasal analiz işlemleri için uygundur [8].

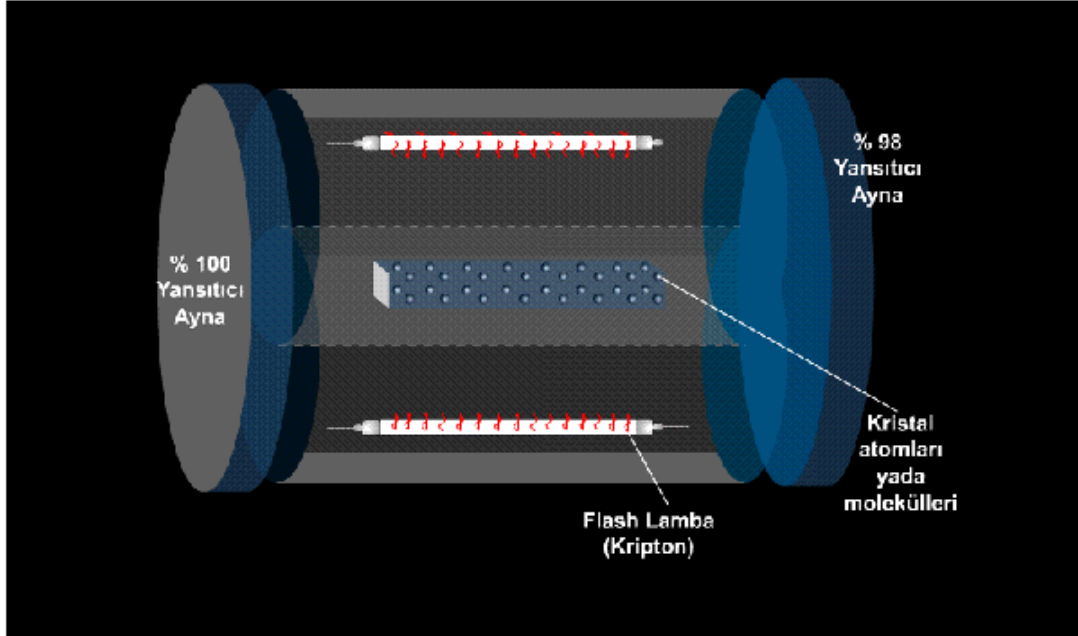


Şekil 3.6. Sıvı lazer sistemi

3.3. Lazerin Çalışma Prensibi

Optik bakımdan saydam, bir ucunda tam sırlı ve yansıtıcı, diğer ucunda yarı sırlı kısmen yansıtıcı iki ayna bulunan bir tüp alınır. Buna gaz, sıvı ve katı bir madde doldurulur. Dışarıdan ışık verme, elektrik akımı geçirmek suretiyle veya kimyasal bir yolla elde edilen enerji, ortamdaki atomlara ulaşır. Bunların bazıları bu enerjiyi emerler. Fazla enerji, atomları kararsız hale getirir. Kendisine bir foton çarpan, uyarılmış ve kararsız atom, fazla enerjiyi foton yayarak verir. Fotonlar, benzer şekilde diğer fotonların yayılmasını sağlar. Uçlara ulaşan fotonlar, aynalardan yansıtılarak geri dönerler ve olay devam eder. Uyarma ve tahriklerde ortamdaki fotonlar artar. Atomların hemen hemen hepsi, foton yaymaya başlayınca kuvvetlenen ışık, yarı sırlı uçtan dışarı çıkar. Bu, lazer ışınıdır. Lazer dalgalarını, uygun adım giden aynı üniforma ve şekle sahip askerlere, normal ışığı ise rasgele düzeni bozuk bir orduya benzetmişlerdir. Normal ışıkta dalgalar, birbirini zayıflatıcı karakterde olmasına rağmen, lazerde birbirini kuvvetlendirici olurlar. Lazer ışınları yüksek frekanslı olduklarından güneş ışını özelliklerine sahiptir. Ancak lazer ışınları tek frekanslı olduğu için kayıpları azdır. Ayrıca lazer ışınları aynı fazda yapılan ışık

dalgaları olduğu için şiddeti büyük olur. Bu yüzden lazer ışınlarının şiddeti güneş ışınlarının şiddetinin bir milyon katıdır.



Şekil 3.7. Basit bir lazer şeması

3.4. Doğal ve Uyarılmış Işıma

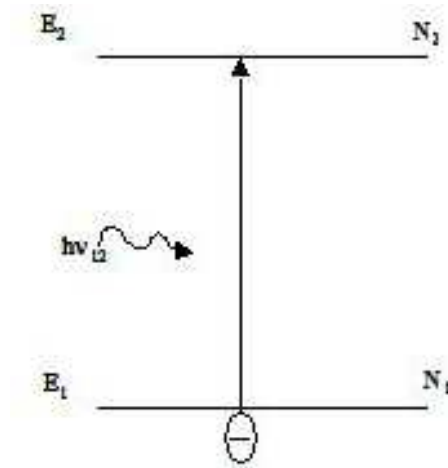
Yarı iletkenlerde lazer davranışı, iki seviyeli bir atomik sistemden tamamen farklı olarak bant yapısı ile ilişkilidir.

Buna karşın iki seviyeli bir sistemdeki temel prensipler, yarıiletkenlerdeki lazer davranışının ve de farklılıkların anlaşılması açısından yararlıdır. En basit sistem iki seviyeye sahip olan izole bir atomdaki durumdur. Bu iki seviyeli sistemin, temel seviyesinin E_1 ve uyarılmış seviyesinin de E_2 enerji seviyeleri olduğunu göz önüne alalım.

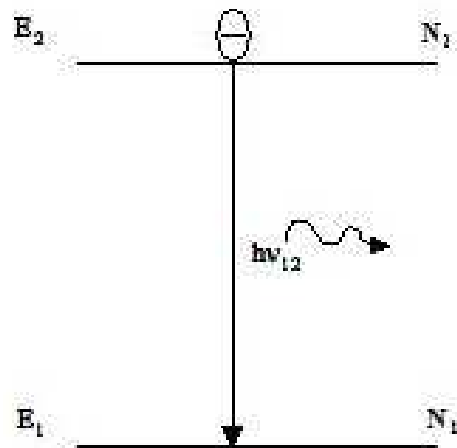
Termal dengede atomların büyük kısmı temel durumdadır, yalnızca çok az atom uyarılmış durumda bulunur. İki seviye arasındaki atomların dağılımı Boltzmann dağılımı ile verilir.

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-h\nu_{12}/k_B T} \quad (3.1)$$

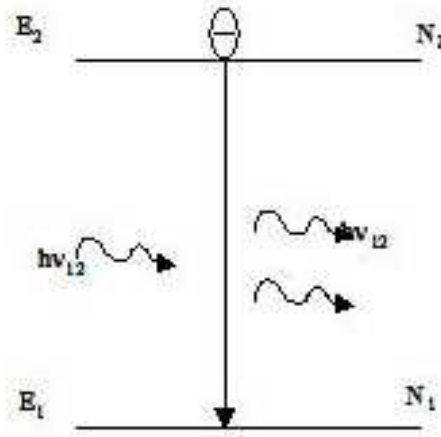
$$h\nu_{12} = E_2 - E_1 = \Delta E \quad (3.2)$$



Şekil 3.8. İki seviyeli bir atomik sistemde foton soğurulması



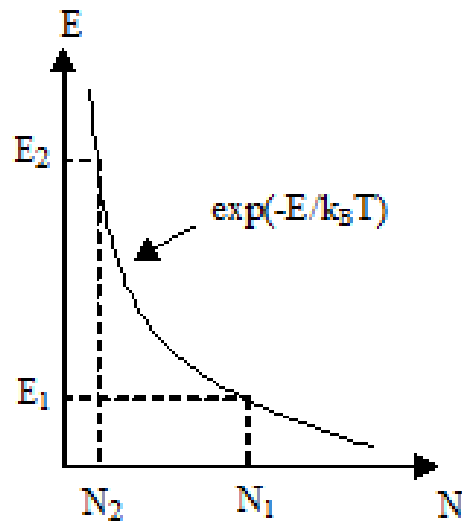
Şekil 3.9. İki seviyeli bir atomik sistemde doğal ışıma



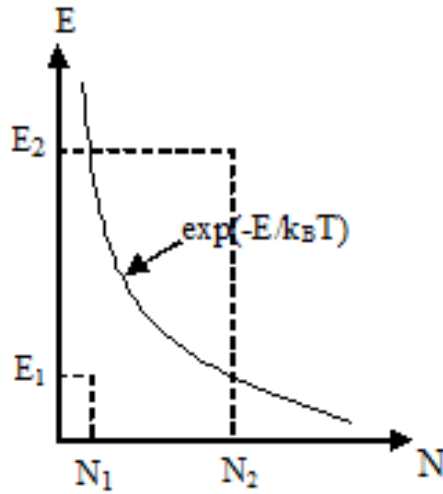
Şekil 3.10. İki seviyeli bir atomik sistemde uyarılmış ışımaya

N_1 ve N_2 sırasıyla alt ve üst seviyedeki atom yoğunluklarıdır. Atom üzerine ΔE enerjili bir foton gönderildiğinde, bu foton belli bir α^{-1} yol uzunluğunda, temel enerjide bulunan atomu uyarılmış enerji seviyesine yükseltmek için (α soğurma katsayısıdır) soğurulur. Belli bir ortalama zaman (τ) sonra atom, kazandığı enerjiyi foton yaymak yoluyla harcayarak temel enerji seviyesine iner. τ doğal taşıyıcı ortalama ömrü olarak adlandırılır. Bu sistem üzerine gelen foton, uyarılmış ışımaya olarak bilinen davranışa da neden olabilir yani ΔE enerjili bir foton üst seviyede bulunan atomla etkileştiğinde bu atomun yine aynı enerjiye sahip olan bir foton yayarak temel enerji seviyesine inmesini sağlar. Bu iki ışımaya yöntemi sırası ile şekil 3.9 ve şekil 3.10'da gösterilmiştir. Üst seviyede bulunan atom alt seviyeye geçerken, τ_{st} uyarılmış ışımaya zamanı içinde bir foton yayar. Bu foton, uyarıcı foton ile aynı frekansa, aynı yayılma doğrultusuna ve faza sahiptir. Doğal ışımaya olayında ise ortamda uyarıcı bir fotonun olması gerekmez, yayılan fotonlar frekansları ν_{12} olsa da rasgele doğrultuda ve rasgele fazlardadır. Soğurma ve uyarılmış ışımaya süreçleri taşıyıcı ve fotonlar arasındaki rezonans etkileşimleridir. Fotonun frekansı (ya da enerjisi), ν_{12} 'e eşit ya da daha büyük olduğu zaman foton, atomun üst seviyeye geçmesini sağlamak üzere soğurulur. Uyarılmış ışımaya için ise üst seviyede enerji kazanmış olan atomlar ve alt seviyede de boş durumlar olmalıdır. Gelen foton, üst seviyede bulunan atomla, kendisi ile aynı frekans ve fazda bir foton üretmek için etkileşecektir. Enerji kazanmış aynı ν_{12} frekanslı ama farklı faza sahip olan atomların toplam nüfusu, doğal ışımaya arttıracaktır. Yayılan fotonlardan çok azı

uyarılmış fotonlardır. Nüfus terslenmesinin sağlanması ile zaten var olan rastgele fotonlar üretilir ve foton yoğunluğunun artması ile uyarılma hızı artar. Normalde termal denge şartları altında N_2 nüfusu çok küçüktür. Bu nedenle nüfus terslenmesi, uyarılmış atom nüfusunun temel durumdaki atom nüfusundan fazla olması için gereklidir. Burada verilen örnek oldukça basit olmakla birlikte oldukça temeldir. Katıhal ve gaz lazerlerinde ışımali geçişler uyarılmış izole atomların ayrık seviyeleri arasında oluşur. Bu durumlarda doğal ışım, çok dar bir spektral bölgeye sahiptir. Yarıiletken lazerlerde ise lazer davranışına katkıda bulunan atomların ya da taşıyıcıların yoğunluğu 10^{18} cm^{-3} ya da daha fazladır. Bu nedenle geçişler enerji bantları arasında olur. İki enerji seviyeli bir sistemdeki nüfuslar şekil 3.11 ve şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Termal dengedeki durum için Boltzmann dağılımı



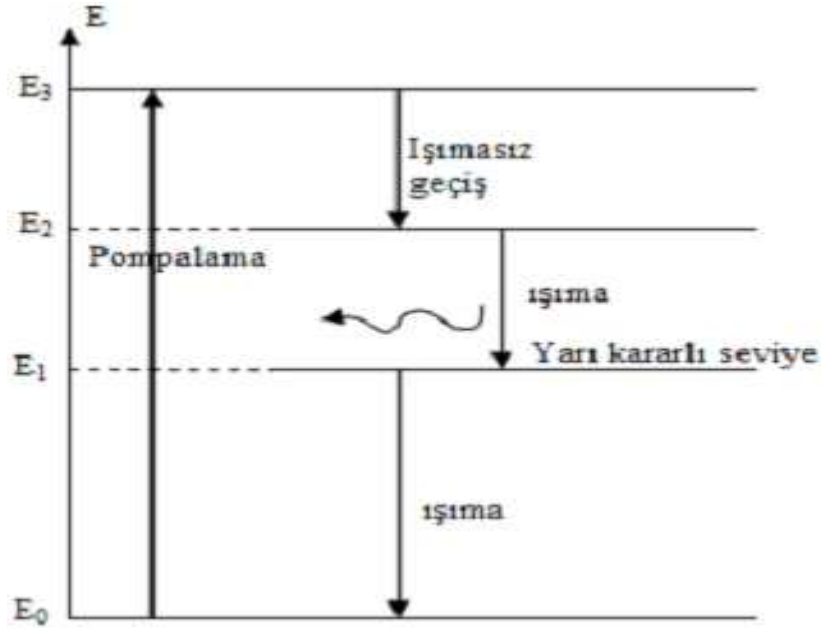
Şekil 3.12. Termal dengede olmayan nüfus dağılımı – nüfus terslenmesi

2 seviyeli sistemlerde nüfus terslenmesi elde edilemez, bu nedenle 3 ya da 4 seviyeli sistemler kullanılır.

Üç enerji seviyeli sistem temel enerji seviyesi, bir yarı kararlı seviye ve bu seviyenin üzerindeki üçüncü bir enerji seviyesinden oluşmaktadır. Başlangıçta atomik dağılım Boltzmann kanununa uyar. Atomları en üst seviyeye kadar uyarabilecek uygun bir pompalama ile atomlar E_2 seviyesine çıkarılabilir. Bu seviye normal bir seviyedir, bu nedenle atomlar hızla ışısız olarak E_1 ya da E_0 seviyesine inerler. Bu yüzden E_2 'de sürekli boş durumlar olacaktır. Yarı kararlı olan E_1 seviyesi, E_1 'de daha fazla atomun yığılmasına izin veren bir seviyedir. Belli bir süre sonucunda E_1 durumunda bulunan atomların yoğunluğu N_1 , temel durumdaki atomların yoğunluğu N_0 'dan daha fazla olur ve bu iki seviye arasında nüfus terslenmesi elde edilir.

Temel durumdaki atomlarının yarısından çoğu nüfus terslenmesi oluşturmak için yarı kararlı seviyeye pompalanmalıdır. Buna karşın şekil 3.13'de verilen He-Ne lazer gibi dört seviyeli lazerler çok daha düşük pompalama gücüne gereksinim duyarlar. Dört enerji seviyesi durumunda pompalama, atomları temel seviyeden E_3 seviyesine uyarır ve bu atomlar hızla yarı kararlı E_2 seviyesine inerler. Buna karşın, E_3 ve E_1 seviyelerinin nüfusu pek değişmediğinden, E_2 enerji seviyesindeki atomların

sayısındaki küçük bir artış, nüfus terslenmesini yaratır ve ışıma bu seviye ve E_1 seviyesi arasında olur.



Şekil 3.13. Dört seviyeli sistem, He-Ne lazeri

3.5. Diyot Lazerler

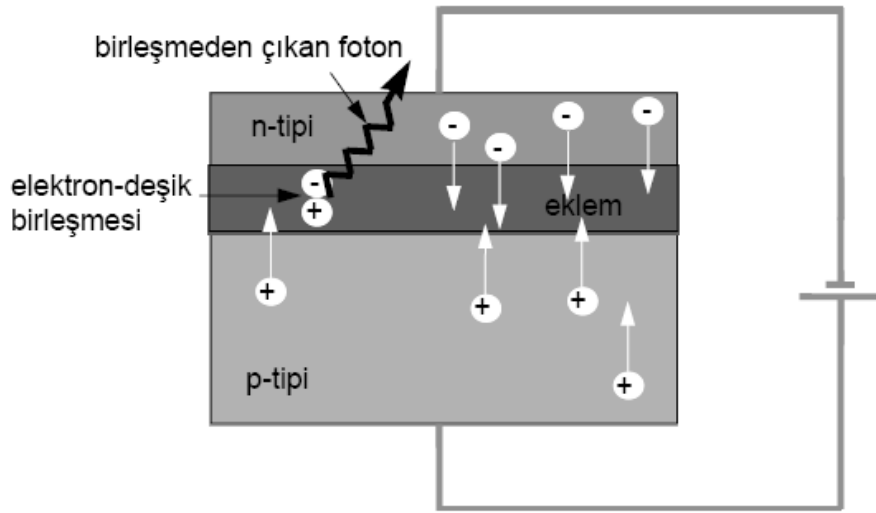
Yarıiletken diyot lazerleri, atomik lazerlerden, enerji seviyeleri ve pompalama mekanizmalarından dolayı oldukça farklıdır. İzole edilmiş atomların tek enerji seviyesinden farklı olarak, yarı iletkenlerdeki elektronlar geniş bir banttaki enerji seviyelerindedir. Her bant, çok büyük sayıda ve birbirine yakın enerji seviyelerinden oluşmaktadır.

Yarıiletkenlerin özellikleri elektronik aletlerin çalışma şekli için önemlidir ve bu durum genellikle yarıiletkenlerdeki iki bölgenin (p ve n bölgeleri) eklem noktasında meydana gelmektedir.

Yarıiletken eklemleri madde katkılanarak yapılır. Şekil 3.14’de gösterildiği gibi, yarıiletken diyodun p – tarafına ise eksi voltaj uygulandığında p ve n taşıyıcıları eklem üzerinden aygıtın diğer tarafına çekilmektedir.

Diyot lazerleri çeşitli parametreler tarafından sembolize edilir. Bu parametreler ve temel tanımlarının bazıları aşağıdaki gibidir.

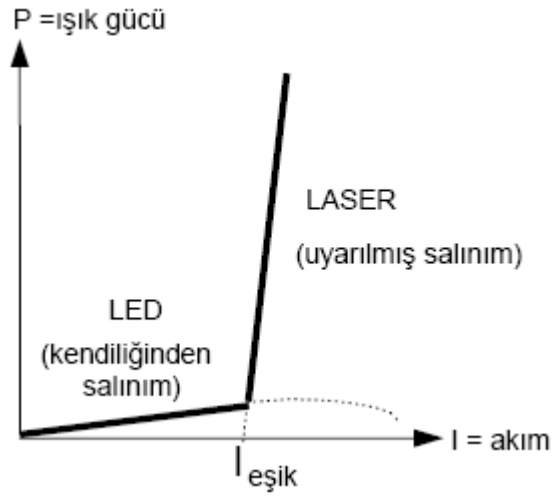
Seri direnç (R_S)	: Diyot lazeriyle seri olan direnç
Eşik akımı (I_{th})	: Lazer olayının başladığı akım
Eşik akımı yoğunluğu (j_{th})	: Birim alana düşen eşik akımı
Türevsel kuantum verimi (η_d)	: Akımdaki artış için ışıktaki artış oranı
Lazer dalga boyu Eşik akımı (λ_p)	: Lazer olayının maksimum olduğu dalga boyu
Bant genişliği ($\delta\lambda$)	: Lazerin dalga boyu bant genişliği



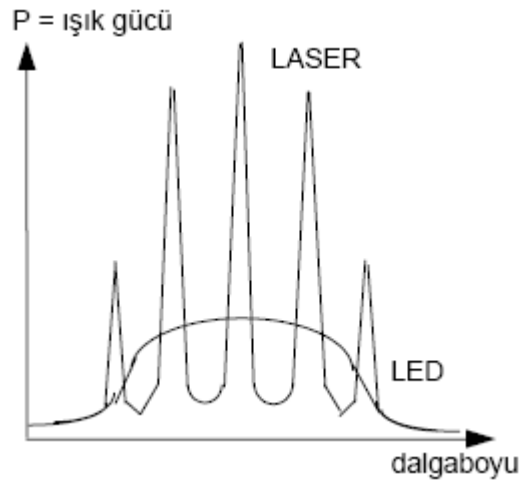
Şekil 3.14. Diyot lazerin optoelektronik çalışma prensibi

Eklem noktasının yakınında, iki taşıyıcı türü eşit yoğunlukta bulunmaktadır ve birbirlerini “birleşmek” yöntemi ile silebilmektedir. Bazı yarıiletkenlerde (silisyum gibi) yeniden birleştirme enerjisi, ısı halinde dışarı bırakılmaktadır. GaAs gibi diğer yarıiletkenlerde ise birleşme enerjisi ışık halinde bırakılmaktadır. Birleşen elektronlar ve deşiklerden çıkan ışık, ışık saçan diyotlar (light emitting diode (LED)) ve yarıiletken diyot lazerlerin temelini oluşturur. Düşük akım seviyelerinde, diyot lazerleri LED’ler gibi kendiliğinden salınım yaparlar. Fakat, akım seviyesi arttıkça diyot lazerleri eşik akımına ulaşırlar ve nüfus ters çevrimiyle lazer çalışır. Şekil 3.15’de görüldüğü gibi eşikten geçtikten sonra ışık gücü dik artmaktadır. Bu

davranış, uyarılmış salınımın göstergesi olup, şekil 3.16'da gösterilen yansımanın boylamasına optik modlarının sağladığı geri bildirimle etkin hale gelir.



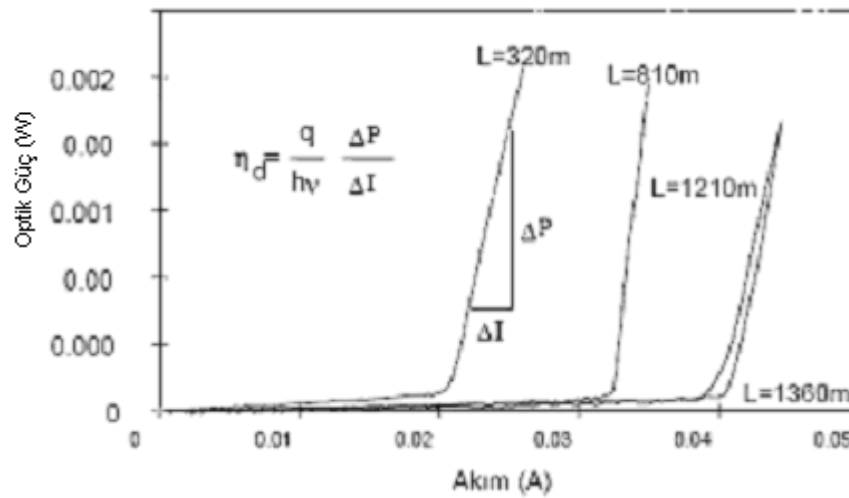
Şekil 3.15. Işık gücünün akıma göre değişimi



Şekil 3.16. Işık gücünün dalgaboyuna göre değişimi

3.5.1. Diyot lazerlerde eşik akımı

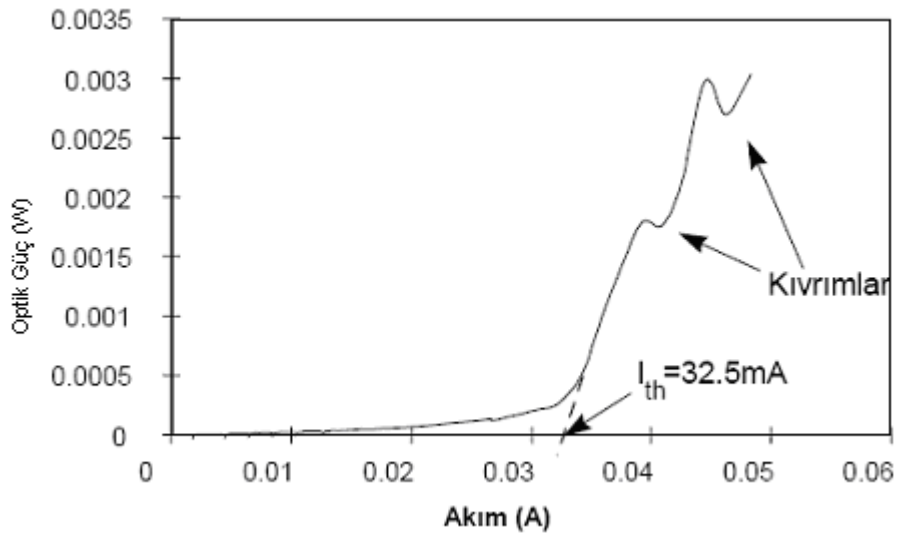
Diyot lazerinde küçük akımlar için sadece kendiliğinden salınım meydana gelir. Akım arttıkça, ortamın kazancı artar ve uyarılmış salınım kendiliğinden salınımı geçer. Lazer olayının başlangıcı ışığın gücündeki ani bir artışla kendini belli eder. Bundan sonrada ışık gücü ile akım arasında doğrusal bir ilişki vardır. Lazer olayının başladığı akıma eşik akımı denir. Şekil 3.17’de farklı uzunlardaki lazer diyotların akım – optik güç özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.17.Çeşitli uzunluklardaki diyot lazerinin akım-optik güç eğrileri

3.5.2. Diyot lazerlerde akım – optik güç özellikleri

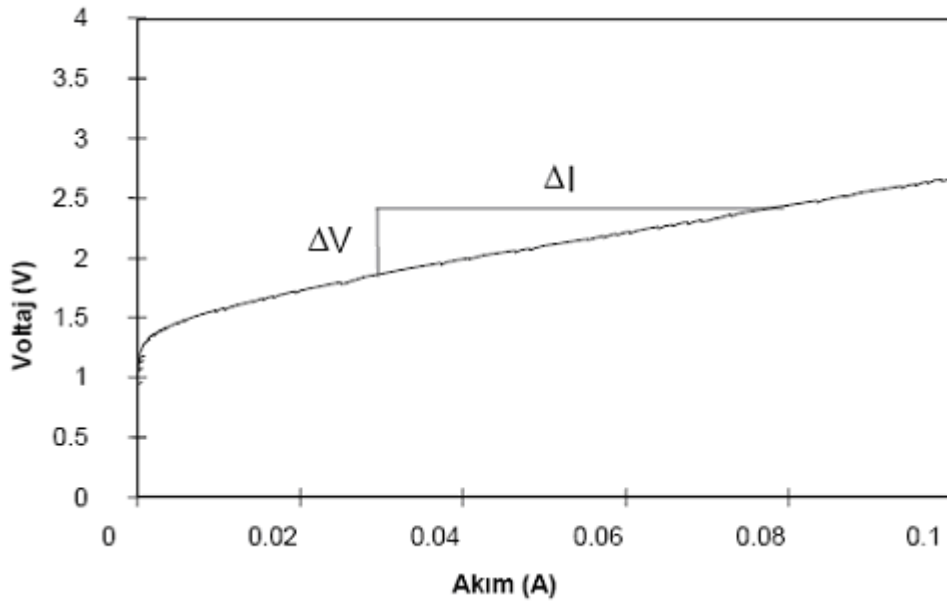
Işık gücü ile akım arasındaki ilişki diyot lazerin temel karakteristiğidir. Bu değer ölçülerek eşik akımı, eşik akım yoğunluğu ve türevsel kuantum verimi bulunur. Şekil 3.18’de akım – optik güç özellikleri görülmektedir. Şekilde 3.18’de yer alan eğrideki kıvrılmaların sebebi, lazerin akımı değiştikçe bir optik moddan diğerine geçmesinden dolayıdır.



Şekil 3.18. Diyot lazerinin akım-optik güç eğrisi

3.5.3. Diyot lazerlerde akım – voltaj özellikleri

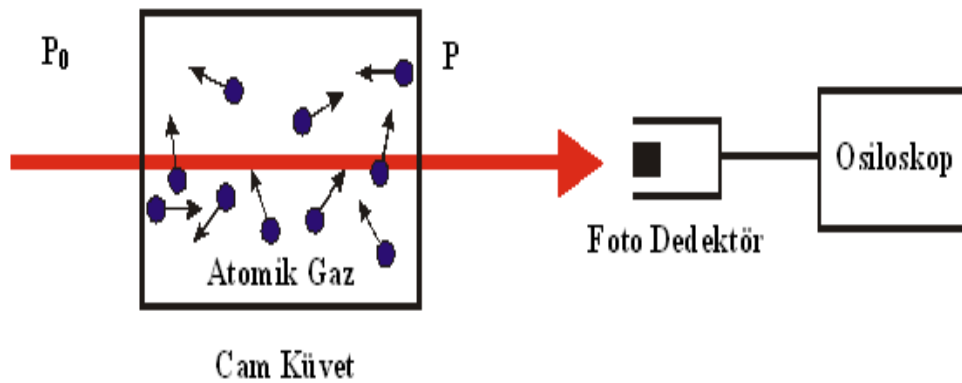
Akım – voltaj özellikleri, diyot özelliklerini ve seri direnci ölçerek aygıtın elektronik özelliklerini belirler. Eğer aygıtlar iyi üretilirse, p – n ekleminden dolayı, tipik diyot akım – voltaj özelliği göstermeleri beklenir. Lazer diyotlarda önemli bir parametre olan seri direnç, voltaj değişikliği akım değişikliğine bölünerek bulunur. Yüksek seri direnç ısınmaya ve lazer frekasında değişime sebep olur. Şekil 3.19’da lazer diyotların akım – voltaj özellikleri verilmiştir [9].



Şekil 3.19. Diyot lazerinin akım-voltaj eğrisi

3.6. Atomik Gazlarda Soğurum Spektroskopisi

Bu bölümde; frekansı değişebilen lazer demetinin atomik gazla etkileşiminde, lazer fotonlarının atomlar tarafından soğurulmasının, etkileşim sonucunda elde edilen soğurum spektrumunun kullanılmasıyla hangi bilgilerin alınabileceğinden ve bu soğurum spektrumunun metrolojik uygulamalarından bahsedilecektir.



Şekil 3.20. Cam küvet içindeki atomik gazla etkileşime giren lazer ışın demeti

İçerisinde atomik bir gaz olan şekil 3.20'deki gibi cam bir küvet varsayalım. Bu cam küvetin içerisindeki atomların herhangi bir x yönü boyunca hız dağılımı (Atomların sayısının onun hızına bağlılığı) Maxwell-Boltzmann hız dağılımına göre eşitlik 3.3'deki gibi belirlenmiştir.

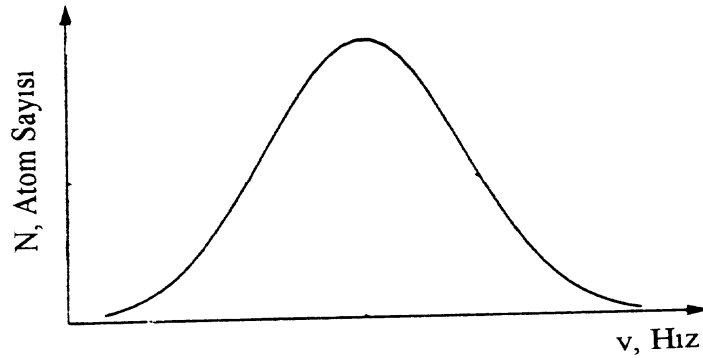
$$N = N_0 \frac{1}{v_0 \sqrt{\pi}} \exp \left[- \left(\frac{v_x}{v_0} \right)^2 \right] \quad (3.3)$$

Burada;

N_0 : Atomların sayısının ortalama hızdaki maksimum sayısıdır.

v_0 : Atomların maksimum ortalama hızıdır.

Bu küvet içerisindeki atomların sayısının onların hızına bağlılığı grafiği şekil 3.21'de verilmiştir. Bu atomların E_1 ve E_2 temel enerji seviyelerine sahip olduklarını varsayalım.



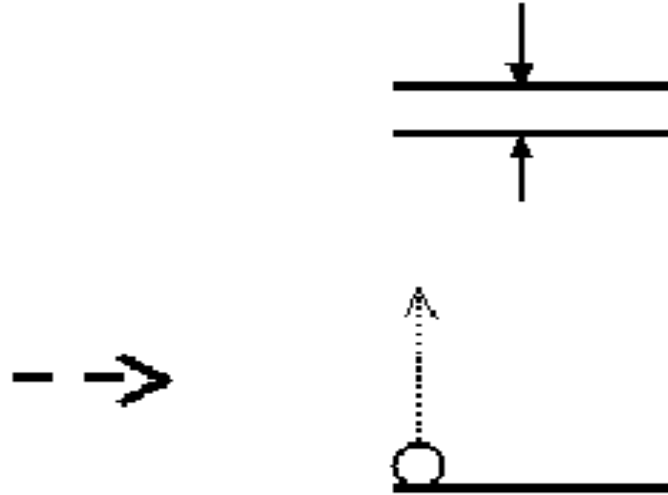
Şekil 3.21. Maxwell dağılımınca atom sayısının hızlarına göre değişimi

Şekil 3.21'de görüldüğü gibi, eğer lazer demeti cam küvetin içerisinden bir x yönü boyunca ilerlerse atomların lazer demeti ile etkileşime girme olasılığı vardır. Eğer lazer frekansı, ω_L ; atomların E_1 enerji geçişlerine denk gelirse başka deyişle eşitlik 3.4'deki gibi atomlar hareketsiz halde ise temel enerji seviyesindeki atom $h \omega_L$ enerjisine sahip fotonu yutarak E_1 temel enerji seviyesinden E_2 temel enerji

seviyesine çıkaracaktır. E_2 enerji seviyesine çıkan atom orada doğal yaşam süresi τ_{rad} kadar kalır ve daha sonra spontan olarak herhangi bir yöne bu fotonu bırakarak E_1 temel enerji seviyesine geri döner.

$$\omega_L = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (3.4)$$

Sezyum (Cs) atomları için bu $6P_{3/2}$ enerji seviyesindeki doğal yaşam süresi 30 ns'dir. Cs atomları için Heisenberg belirsizlik ilkesiyle belirlenmiş E_2 enerji seviyesinin çizgi kalınlığı 5 MHz olarak bilinmektedir.



Şekil 3.22. Elektromanyetik dalganın atom tarafından soğurumu

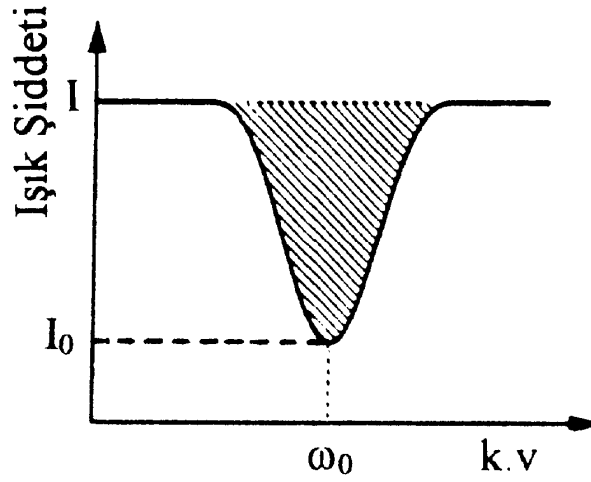
Eğer atomlar hareketli ise ki genelde görülen durum budur v hızı ile hareket eden atomların k dalga vektörüne sahip lazer demetiyle etkileşiminin sağlanması için Doppler kuralına göre lazer demetinin frekansı eşitlik 3.5'deki kurala göre bulunur.

$$\omega_L - \omega_0 = \vec{k} \cdot \vec{v} \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.5’de verilen ω_0 değeri aşağıdaki gibidir.

$$\omega_0 = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (3.6)$$

Lazerin atomik gazla etkileşimi sonucunda lazer demetinin bir kısmı atomlar tarafından soğurulduğu için küvet çıkışındaki lazer demeti gücü giriştekenden her zaman az olacaktır. Küvet çıkışındaki lazerin gücünün lazer frekansına bağlılığı atom sayısının, hıza göre değişimi de şekil 3.23’de verilen grafikteki gibi olacaktır.



Şekil 3.23. Atomlar tarafından soğrulan lazer ışık gücünün atomların hızlarına göre değişimi

Lazer demetinin rezonans atomik gazla etkileşimi sonucunda gücünün küvet boyunca azalması aşağıdaki formüle göre gerçekleşmektedir.

$$P = P_0 e^{-\alpha l} \quad (3.7)$$

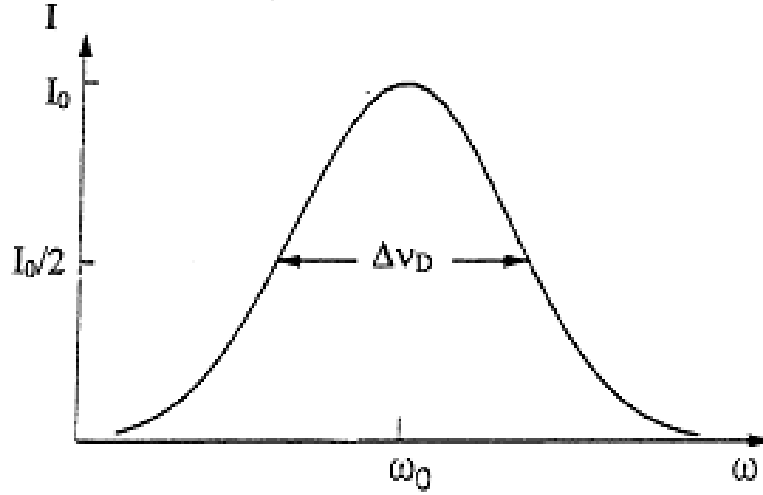
Burada;

P_0 : Lazer demetinin küvet girişindeki gücü

l : küvet uzunluğu

α : atomların ve lazerin parametrelerine bağlı bir katsayıdır.

Etkileşim sonucunda elde edilen yutulma katsayısının frekansa bağlılığı kuvvet içindeki atomik gazın frekansa göre değişimi şekil 3.24'deki grafiğine çok benzerdir.



Şekil 3.24. Atom soğurum rezonansında hızından dolayı oluşan Doppler genişlemesi

Bu doppler soğurum çizgisinin çizgi kalınlığı ise daha çok kuvvet içindeki sıcaklıkla belirlenmektedir ve şu formülle ifade edilir.

$$\Delta\omega_D = 4\pi\omega_0 \sqrt{\frac{2k_B T}{Mc^2} \ln 2} \quad (3.8)$$

k_B : Boltzmann katsayısı

M : atomik kütle

c : ışık hızı

T : atomik gazın sıcaklığıdır.

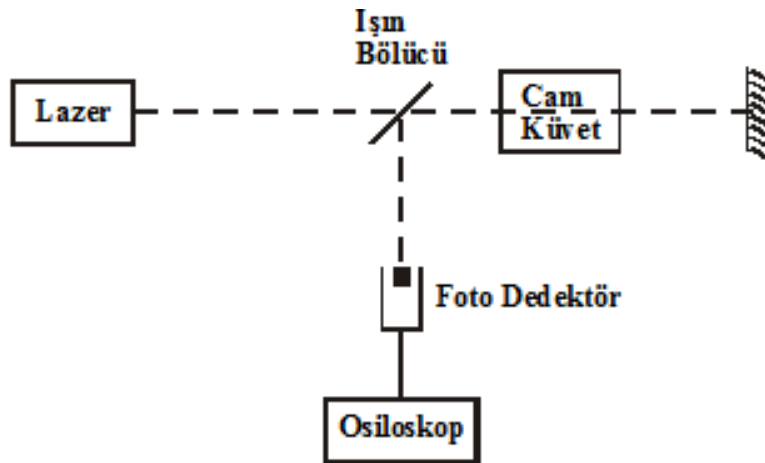
Örneğin Cs atomlarının D_2 enerji geçişinde $6S_{1/2} - 6P_{3/2}$ enerji geçişlerine uygun gelen ω frekansı $\omega_0 = 5 \times 10^{14}$ Hz ve oda sıcaklığındaki (300 K) atomik gaz için ise $\Delta\omega_D = 5 \times 10^8$ Hz'tir (500 MHz).

Sonuç itibariyle frekansı değişebilen ve gücü sabit lazer demetinin rezonans atomik gazla etkileşimi sonucunda merkez frekansı ω_0 olan ve çizgi kalınlığı $\Delta\omega_D$ olan soğurum spektrumu elde edilmektedir ve bu yöntemle atomların enerji geçişleri arasındaki fark eşitlik 3.9'daki gibidir.

$$E_2 - E_1 = h (\omega_0 \pm \Delta\omega_D) \quad (3.9)$$

$\Delta\omega_D$ Doppler belirsizliğiyle ölçülmüş olmaktadır. Bu belirsizlik atomların hız dağılımından kaynaklanmaktadır.

Bu belirsizliğin azaltılabilmesi için doyum soğurum spektroskopisi yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.25'de verilen bu yöntemde; atomik gazın aynı zamanda karşı karşıya yönlendirilmiş iki lazer demetiyle etkileşiminden istifade edilmektedir.

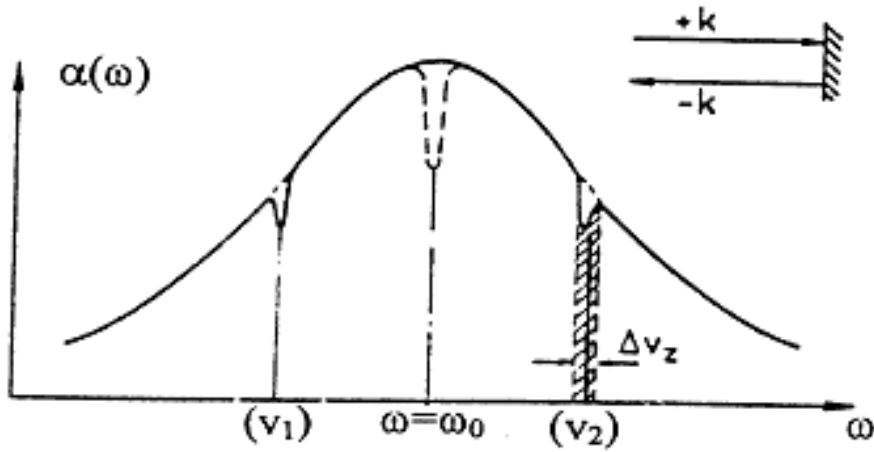


Şekil 3.25. Alt – Doppler doyum rezonanslarının gözlenmesi için kurulmuş deney düzeneği blok şeması

Lazer demeti küvet içerisinden geçirilerek aynadan geri yansıtılır. Geri yansıyan lazer demeti yeniden atomik gazla etkileşime girerek demet bölücü aracılığıyla dedektörle algılanır.

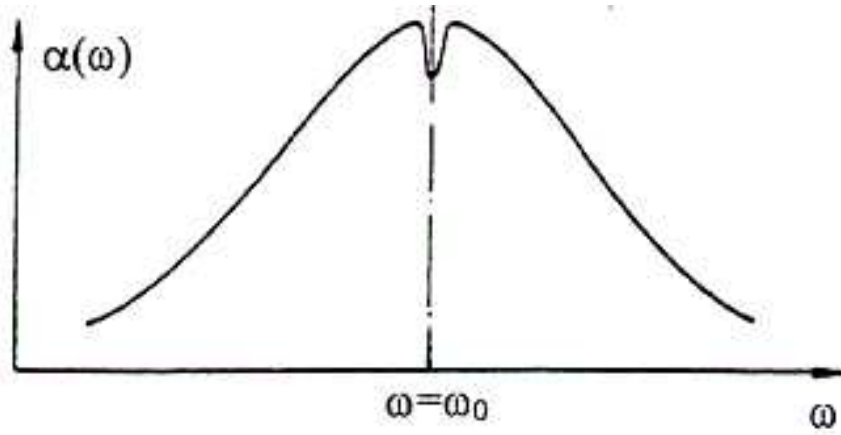
Küvet içerisinde karşı karşıya gönderilmiş iki lazer demetinin frekansları aynı fakat yönleri başka deyişle, dalga vektörleri ($+k$, $-k$) farklıdır. Bu nedenle Doppler etkisine göre eğer lazer frekansı ω_0 eşit değil ise karşı karşıya gönderilen iki lazer demeti eşitlik 3.10'daki gibi farklı hızlarda hareket eden atomik grup ile etkileşime girerek şekil 3.26'da verilen çökmeler oluşacaktır.

$$v = \frac{\omega_L - \omega_0}{k} \quad (3.10)$$



Şekil 3.26. Doppler soğurum spektroskopisi üzerinde bir lazer demetiyle elde edilen çökme

Lazer frekansı ω_0 a eşit olursa ($\omega_L = \omega_0$) her iki yöndeki lazer demeti aynı grup atomlarla (Lazer demetine dik olan atomlarla etkileşime girecektir). Dedektöre gönderilen prob (algılayıcı) lazer demeti karşı yönde gönderilen pump (pompalama) lazer demetinin etkilediği atomik grupla aynı anda etkileşecek ve şekil 3.27'de görülen lamb çukuru oluşacaktır.



Şekil 3.27. Doppler soğurum spektroskopisinde rezonans frekansta ($\omega = \omega_0$) oluşan Lamb çukuru

Pump lazer demeti belli sayıdaki atomları E_2 enerji seviyesine çıkardığı için, prob lazer demetinin E_1 enerji seviyesinde algıladığı atom sayısında azalma gözlenecektir. Özellikle vurgulanması gereken bir diğer şey ise bu etkileşimin ω_0 frekansında seçici karakter taşıdığıdır. Bu seçiciliğin bantgenişliği $\Delta\omega_D$ ile değil γ_{rad} ile belirlenecektir. Gerçekte bu bant genişliği γ birkaç fiziksel etkenden dolayı γ_{rad} olmayıp daha büyüktür. Bunlardan bir tanesi doyum etkisi, ikincisi karşı karşıya gönderilen iki demet arasındaki açı bir diğeri ise atomlar arasındaki çarpışmalardır. Bu durumda γ değerini eşitlik 3.11'deki gibi yazılabilir.

$$\gamma = \gamma_{rad} \sqrt{1+G} + \Delta\omega_D \times \theta + \gamma_c \quad (3.11)$$

Görüldüğü gibi çarpışmanın bulunmadığı ortamda; Cs atomları için oda sıcaklığında çarpışma hemen hemen yok gibidir, Cs atomları için serbest uçuş mesafesi 300 m olarak bilinmektedir küvet uzunluğu ise 3 cm'dir bu nedenle çarpışma yok sayılır ve γ_c terimi ihmal edilebilir .

İki lazer demeti karşı karşıya çok küçük açıyla ayarlanmış ise ($\theta < 10^{-3}$ radyan ise) o zaman açıdan kaynaklanan genişleme 0.5 MHz'ten küçük olacaktır. Eğer karşı karşıya gönderilen demetlerin gücü soğurumun doyumu için az ise ($G \ll 1$) bu durumda eşitlik 3.11' de verilen formüle göre elde edilen doppler-altı rezonansların çizgi kalınlığı $\gamma_{rad} = 5$ MHz olarak bulunacaktır.

Sonuç olarak doyum soğurum spektroskopisi yöntemi ile atomların enerji geçişleri $E_2 - E_1$ arasındaki farkı eşitlik 3.12'deki doğrulukla elde etmek mümkün olacaktır.

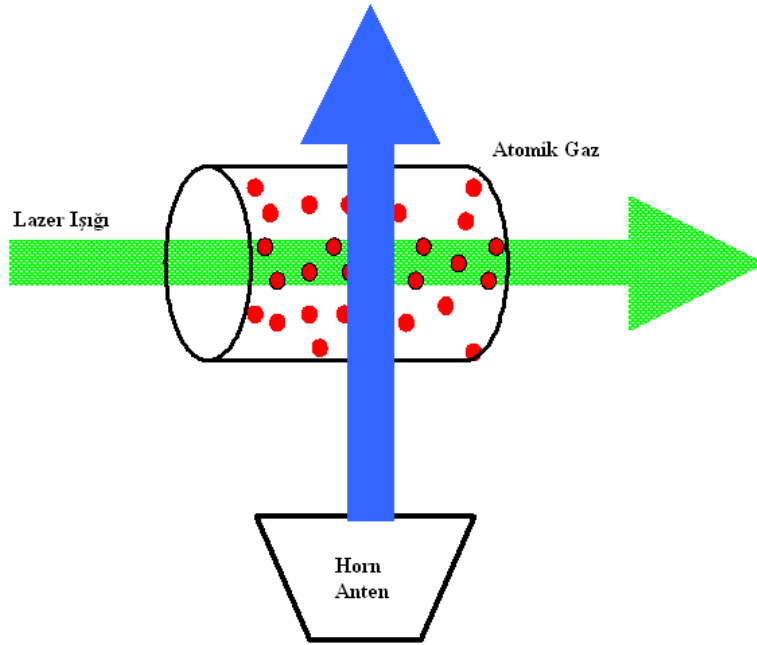
$$E_2 - E_1 = h (\omega_0 \pm \gamma) \quad (3.12)$$

Ayrıca doyum soğurum spektroskopisi ile fizik ve metrolojide önem taşıyan şu bilgileri elde etmekte mümkündür.

- Spektral çizgilerin frekanslarının ölçülmesiyle, atomların enerji seviyeleri hakkında bilgi edinilmesi,
- Çizgi yoğunluğundan (line intensity) veya soğurum genliğinin atomun enerji seviyeleri arasındaki geçiş olasılıklarının hesaplanması,
- Spektral çizgilerin doğal genişliklerinden uyarılmış seviye atomlarının bu seviyelerdeki ortalama yaşama ömürlerinin elde edilmesi,
- Doppler genişliğinin ölçülmesiyle, soğuran veya ışınım yapan atomların hız dağılımları ve atomların sıcaklıklarının bilinmesi,
- Spektral çizgilerdeki ışık basıncından dolayı olan genişlemeler, atomlar arasındaki çarpışmalar ve yine atomlar arasındaki potansiyel çekim kuvvetleri hakkında bilgi edinilmesi,
- Spektral çizgilerdeki Zeeman ve Stark bölünmeleri ise atomik enerji geçişlerinin dış manyetik ve elektrik alandaki bölünmeleri (kaymalarını) göstermektedir [10].

BÖLÜM 4. DENEY DÜZENEĞİ

Bu tez çalışmasında kurulan deney düzeneğinin blok diyagramı şekil 4.1’de verilmiştir. Genel olarak deney düzeneği iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm optik sistemi, ikinci bölüm ise mikrodalga sistemi kapsamaktadır.

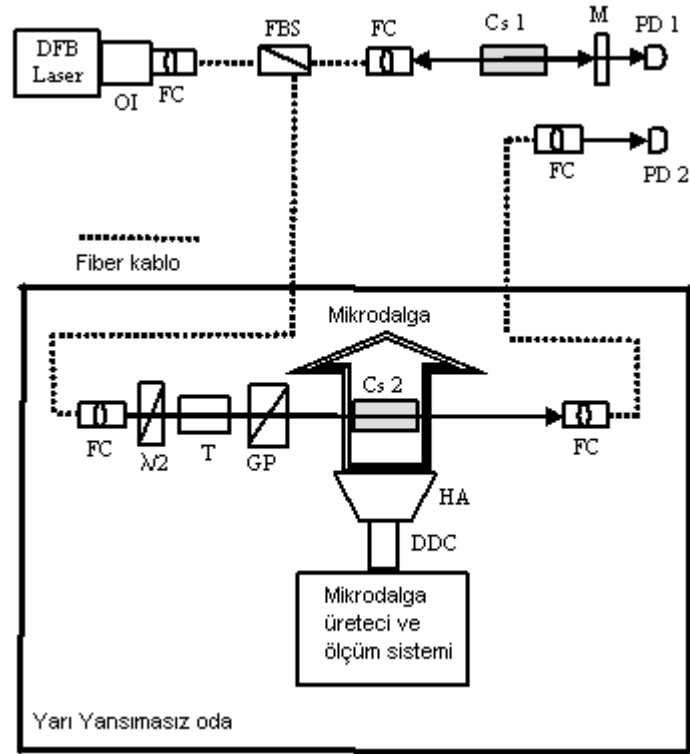


Şekil 4.1. Deney düzeneği blok şeması

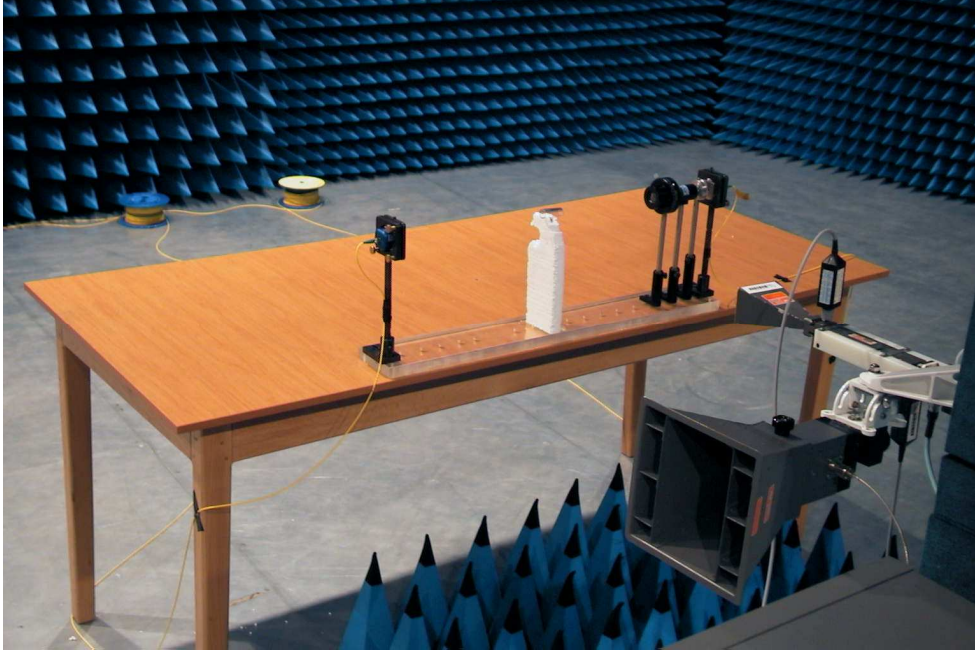
4.1. Optik Sistem

Deneylerde lazer kaynağı olarak DFB diyot lazer kullanılmıştır. Diyot lazer çıkış ışınımı, fiber ışınım bölücü (FBS) ile iki kısma ayrılarak referans Cs küveti (Cs_1) ve lazer – atom – mikrodalga etkileşiminin araştırıldığı Cs küveti (Cs_2) etkileşime sokulur. Paralel lazer ışınımı fiber couplerdan (FC) çıktıktan sonra referans Cs_1 küvetinin içinden yansıma katsayısı $R = 0.99$ olan aynadan geçirilerek foto diyot tarafından (PD_1) algılanır. Küvetin üzerine düşen ve M aynasından geri yansıyan iki

lazer demeti referans Cs_1 küveti içinde duran dalga şemasını oluşturur. Spektroskopide yaygın olarak kullanılan doyurucu (pump) ve algılayıcı (prob) şeması, foto diyot aracılığı ile doymuş Doppler soğurum spektrumunu gözleme imkanı vermektedir. Bu konu sonuçlar bölümünde daha ayrıntılı olarak anlatılacaktır.



Şekil 4.2. Lazer – atom – mikrodalga etkileşimi deney düzeneği blok şeması



Şekil 4.3. Yarı yansız odada kurulan deneysel Cs küveti deney düzeneği



Şekil 4.4. Oda dışında kurulan referans Cs küveti deney düzeneği



Şekil 4.5. Oda dışında ölçüm için kurulan deney düzeneği

Dış DC manyetik alanın etkisini ciddi bir şekilde azaltmak için referans Cs₁ küveti μ metal içerisine konulmuştur. Bu ekranlama ile küvet içerisinde DC manyetik alan değeri 10 mG'dan daha aza indirilmiştir.

FBS ışınım bölücünden elde edilen ikinci lazer ışınım demeti 50m uzunluğundaki fiber kablo ile asıl araştırmanın yapılacağı yarı yansız oda içerisine gönderilmiştir. Bu fiber kablo ucundaki fiber coupler aracılığı ile ışınım demeti elde edilmiştir. Paralel ışınım demeti, $\lambda/2$ optik plakadan, teleskoptan (T), Glan polarizatörden (GP) ve deneysel Cs₂ küvetinden geçirilerek fiber coupler üzerine düşürülmüştür. Cs atomları ile etkileşime giren bu ışın, tekrardan 50m uzunluğundaki fiber kablo ile yarı yansız oda dışına yönlendirilmiş ve ikinci foto diyot (PD₂) tarafından algılanmıştır. Bu optik şema ile lazer ışınımının hem referans hem de deneysel Cs küvetlerinden soğurum sinyali elde edilmiştir. Varsayalım ki, referans küvette duran lazer ışınım şeması, deney küvetinde ise bir tarafa doğru ilerleyen prob lazer demeti şeması sağlansın. Lazer frekansı ile atomların enerji geçişlerini kapsayacak şekilde tarandığında, Doppler etkisi ile çalışma küvetinin çıkışındaki foto diyotta da hız dağılımına benzer Doppler soğurum spektrumu gözlenecektir. Ancak referans küvet çıkışında ise doyurucu pump dalganın etkisi ile Doppler spektrumu üzerinde atomların enerji geçişlerine denk gelen ince Doppler içi rezonansları da gözlemlenmiş olacaktır.

Deney düzeneklerinde kullanılan diyot lazer ve Cs küveti ile ilgili bilgilerin sunulması faydalı olacaktır.

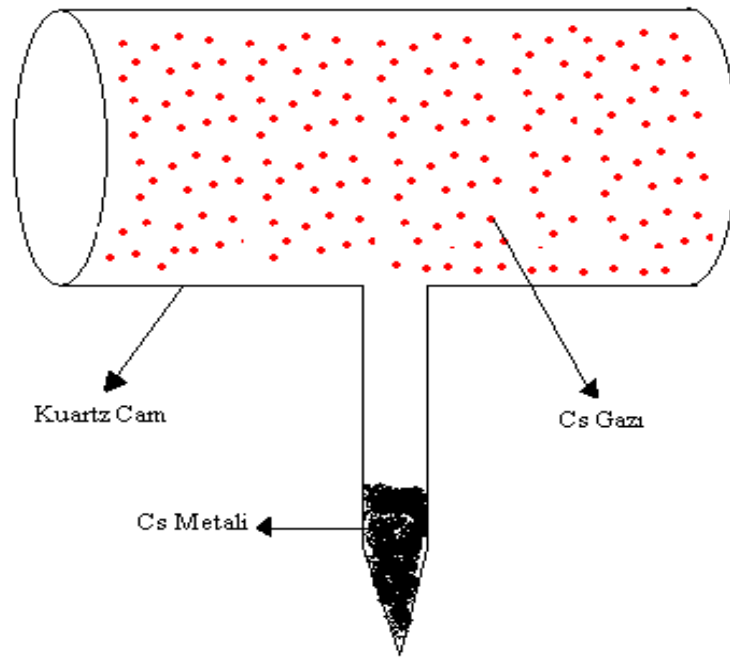
Deneysel çalışmalarda lazer kaynağı olarak geri besleme dağılımlı diyot lazer (Distributed feed – back diode laser) kullanılmıştır. Tek mod rejiminde çalışan diyot lazerin çizgi kalınlığı 3 MHz'den küçük olduğu tespit edilmiştir. Diyot lazerin 17⁰ C sıcaklığında eşik seviyesi (threshold) akım değeri 30 mA olduğu görülmüştür. Lazerin akımı 175 mA'e kadar arttırıldığında lazer çıkış gücü 150 mW değerine ulaşmıştır.

Deneyler sırasında lazer akım değeri ve sıcaklık değeri ayarlanarak lazer ışınımının dalga boyu Cs atomlarının D₂ enerji geçişine uygun gelen 852 nm değerine

ayarlanmıştır. Diyot lazeri sıcaklık değişimi ile lazer dalga boyu 0.0062 nm/K katsayısı ile değiştirilmiştir. Başka bir deyişle lazer diyodunun sıcaklığı 1 K değiştiğinde lazer frekansı 25.68 GHz (25.68 GHz/K) değiştiği görülmüştür.

Lazer frekansının veya dalga boyunun daha hassas değişimi lazer akımının değişimi ile yapılmıştır. Bu durumda lazer frekans değişim katsayısı 1 GHz/ mA (0.0024 nm/mA) olarak tespit edilmiştir. Deneyler sırasında lazer frekans taraması ve soğurum spektrumlarının gözlenmesi için lazer sıcaklığı sabit tutulmuş ve lazer akımı ise ramp (testere) şeklinde değiştirilmiştir. Cs atomlarının Doppler spektrumunun araştırılması deneylerinde lazer frekansı en fazla 3 GHz taranmıştır. Bu durumda lazer sıcaklığı 17.1 °C değerinde sabit tutulmuş, lazer akımı $I_{DC} = 3$ mA DC değeri etrafında $I_{AC} = 3$ mA ramp şeklinde AC akım ile modüle ($f = 10$ Hz) edilmiştir.

Deneylerde kullanılan Cs küvetlerinin şematik çizimi şekil 4.6' da, fotoğrafı ise şekil 4.7'de verilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan referans Cs küvetin çapı 2 cm ve uzunluğu ise 5 cm'dir. Ayrıca buna ek olarak uzunluğu 20 mm ve 3 mm olan iki adet daha küvet kullanılmıştır. Kullanılan Cs küvetinin malzemesi kuartzdır. İçi boş kuartz cam küvetinin içindeki hava vakum pompası ile 1×10^{-6} Torr basınç değerine kadar boşaltılmıştır. Bu işlemden sonra küvetin içine yaklaşık 1 mg Cs metali akıtılmıştır ve cam kaynak ile kapatılmıştır. Cs metalinin erime sıcaklığı yaklaşık 37 °C'dir. Oda sıcaklığında metal halinde olan Cs, küvetin alt kısmında biriktirilir. Bu işlem genelde küvetin diğer kısımlarının ısıtılması ile ve sıcaklık gradyentinin sağlanması ile yapılır. Bu şartlar altında hazırlanmış küvetin içindeki Cs gazı, Cs metalinin doymuş buharı olmaktadır. Oda sıcaklığın (23 °C) doymuş gazın basınç değeri 1×10^{-6} Torr, yoğunluğu ise yaklaşık 3×10^{10} atom/cm³ 'dür.



Şekil 4.6. Cs küvetinin blok şeması



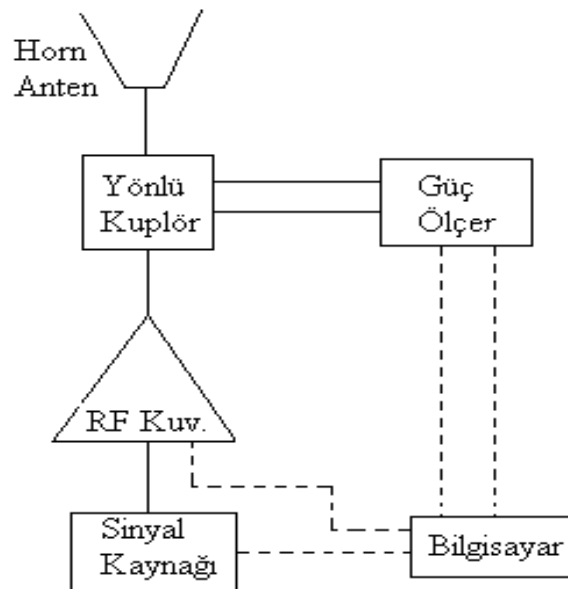
Şekil 4.7. Cs küveti

Oda sıcaklığında uzunluğu 5 cm olan Cs küvetinden geçen rezonans lazer ışınının soğurumu, lazer frekans değerine bağlı olarak %50 değerine varabilir.

4.2. Mikrodalga Sistem

Lazer – atom – mikrodalga etkileşiminin sağlanmasında kullanılan 9.2 GHz frekans değerindeki mikrodalga alanı, sinyal kaynağı, RF kuvvetlendirici ve horn anten kullanımı ile oluşturulmuştur. Şekil 4.8’de verilen horn anten çıkışındaki mikrodalga alanının net güç değerini ölçmek için, antenin girişine yönlü kuplör takılmıştır. Yönlü kuplörün ileri ve yansıyan portları güç sensörleri üzerinden güç ölçere bağlanmıştır. Sinyal kaynağı, RF kuvvetlendirici güç ölçeri kontrol eden yazılım aracılığı ile sistem bilgisayar tarafından kontrol edilmiştir.

Deneyler sırasında mikrodalga gücü ve frekans değeri yazılım ile değiştirilmiştir. Genelde mikrodalga güç değeri sabit tutularak, mikrodalga merkez frekans değeri 9.2 GHz olan referans değer çevresinde taranmıştır. Deneyler esnasında lazer frekansı atomların optik geçişinde ($6S_{1/2} (F=4) - 6P_{3/2} (F1'=4)$) sabit tutularak, mikrodalga frekansı atomların temel enerji seviyesinin ince yarılmasına denk gelen mikrodalga geçişinde ($6S_{1/2} (F=4) - 6S_{1/2} (F1=3)$) taranmış ve radio – optik soğurum rezonansı gözlenmiş ve araştırılmıştır.



Şekil 4.8. Mikrodalga sistemi deney düzeneği blok şeması

BÖLÜM 5. UYGULAMALAR VE SONUÇLAR

Rezonans lazer ve mikrodalga ışımalarının Cs ve Rb atomik gazı ile etkileşiminin araştırılması konusunda literatürde çok sayıda yayın bulunmaktadır. Bu tür çalışmaların büyük çoğunluğu lazer – atom – mikrodalga etkileşiminin, mikrodalga rezonatörü içerisinde yayılması ile ilgilidir. Etkileşim sırasında lazer frekansı atomların optik geçişinde sabit tutularak, mikrodalga frekansı atomların temel enerji seviyelerine denk gelen mikrodalga geçişinde taranır. Mikrodalga frekansının taranması ile lazerin atomlar tarafından soğurumu değişmekte ve ince radio – optik spektrumu gözlenmektedir. Bu radio – optik spektral rezonans, kullanılan mikrodalga kaynağı frekansının atomların enerji geçişinde kilitlenmesinde ve atomik frekans standartı veya atomik saat yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak burada vurgulanması gereken çok önemli bir husus vardır. Mikrodalga rezonatörü içerisindeki lazer – atom – mikrodalga etkileşimi, mikrodalgaın yakın alanında cereyan etmektedir. Yani atomların kaynaktan uzaklığı, mikrodalga boyunun çok altındadır [1, 2, 3].

Bu tez çalışmasında yapılan araştırmalarda ise yukarıda bahsedilen çalışmalardan farklı, tamamen uzak alan şartları sağlanarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Dolayısı ile lazer – atom – mikrodalga etkileşim bölgesi, mikrodalga kaynağından $2D^2 / \lambda$ mesafesinin çok daha uzağına yerleştirilmiştir. Burada;

D: Horn antenin çıkış penceresinin diyagonal ölçüsü (m),

λ : Mikrodalgaın dalga boyu (m)

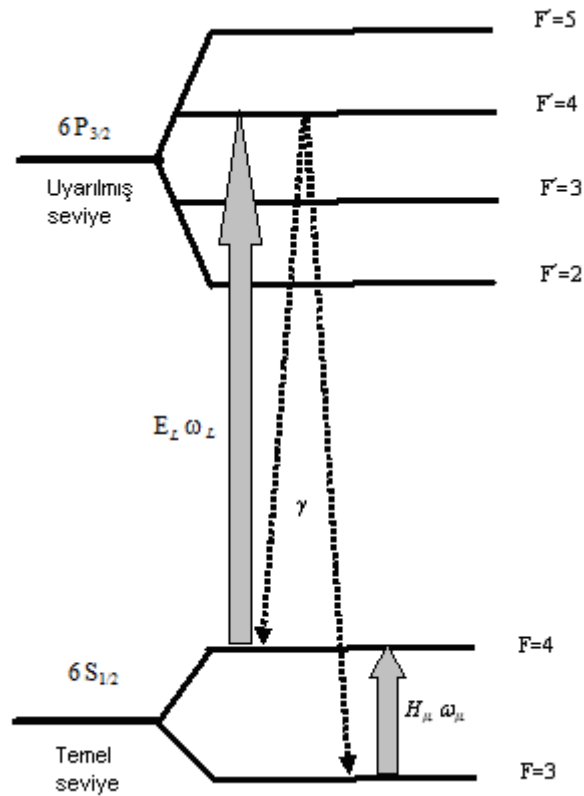
Lazer ile soğutulmuş Cs ve Rb atomik gazların lazer ve mikrodalga etkileşimi deneyleri horn anten kullanılarak da yapılmıştır. Ancak bu çalışmada farklı olarak bu deneyler soğuk ($t < 1$ mK) gaz ile vakum kamerasında yapılmıştır.

Soğuk atomik gazın tutulduğu vakum kamerasında mikrodalga alanı için uzak alan şartı sağlanamamış ve çevredeki metallere mikrodalganın yansıması engellenememiştir. Dolayısıyla bu çalışmadan farklı olarak ideal uzak alan ve serbest uzay şartı sağlanamamıştır [11, 12].

Bu çalışmada sunulacak olan sonuçlar ise uzak alan ve serbest uzay şartının sağlandığı yarı yansız oda içerisinde ve kısmen ($t = 23^{\circ}\text{C}$) atomik gaz ile elde edilmiştir.

5.1. Cs Atomlarının D_2 Enerji Geçişleri

Deneyler Cs atomlarının D_2 enerji geçişinde ($\lambda = 852 \text{ nm}$) gerçekleştirilmiştir. Cs atomlarının D_2 enerji geçişinin şeması Şekil 5.1'de verilmiştir.

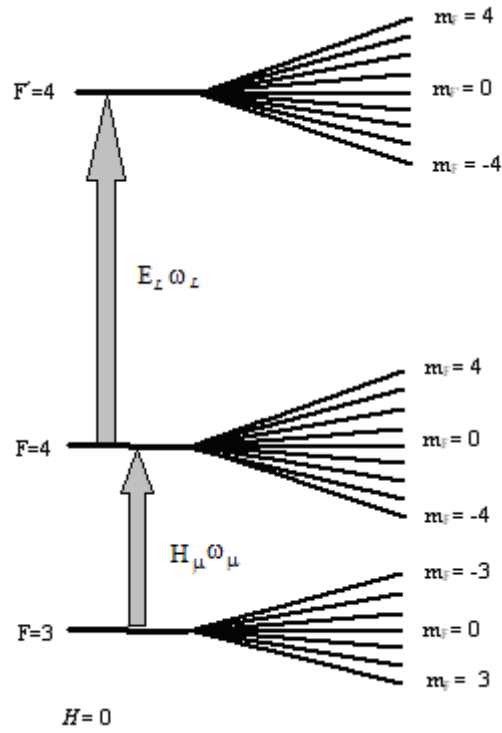


Şekil 5.1. Cs atomunun enerji geçiş şeması

Atomların temel enerji seviyesi $6S_{1/2}$, üst enerji seviyesi ise $6P_{3/2}$ 'dir. Temel enerji seviyesindeki elektronların orbital momenti $l = 0$, spini ise $s = 1/2$ 'dir. Bu durumda elektronların toplam açısai momentii $j = l + s = 1/2$ 'dir. Atom çekirdeğinin açısai spin momentii $I = 7/2$ 'dir. Temel seviyesindeki elektronların atom çekirdeğii ile etkileşimini dikkate alındığında atomların toplam momentii $F = I + J$ olarak bulunur. Elektronların toplam J momentleri ise $F = 7/2 + 1/2 = 4$ ve $F = 7/2 - 1/2 = 3$ olan iki alt enerji seviyelerine $6S_{1/2} (F = 4)$ ve $6S_{1/2} (F = 3)$ bulunmaktadır. Bu iki alt seviye arasındaki enerji farkı $\Delta E_{4-3} , 9.2 \text{ GHz} = \Delta E_{4-3} / h$ 'e denk gelmektedir.

Cs atomlarının mikrodalga ile etkileşimide bu $6S_{1/2} (F = 3) - 6S_{1/2} (F = 4)$ geçişte yapılmaktadır. Üst enerji seviyesinde $6P_{3/2}$ elektronlarının toplam momentii, $j = l + s = 1 + 1/2 = 3/2$ 'dir. Elektronların çekirdek ile etkileşimini sonucunda üst enerji seviyesinde atomların toplam momentii $F = J + I$, $3/2 + 7/2 = 5$, $3/2 + 7/2 - 1 = 4$, $3/2 + 7/2 - 2 = 3$ ve $3/2 + 7/2 - 3 = 2$ olarak yer alır. Dolayısı ile üst enerji seviyesi $6P_{3/2}$ dört alt seviyeye $6P_{3/2} (F = 5, 4, 3, 2)$ bölünmektedir. Deneyler sırasında lazer frekansı $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 5, 4, 3)$ seviyelerini kapsayacak şekilde taranmış veya $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 4)$ enerji seviyesine denk gelecek şekilde sabit tutulmuştur.

Cs atomları dış DC manyetik alanda bulunduğu Zeeman etkisine göre enerji seviyeleri şekil 5.2'deki gibi Zeeman seviyelerine ayrışır.



Şekil 5.2. Cs atomunun enerji geçiş şeması, Zeeman ayrışmalarının aşırı ince geçişleri

$6S_{1/2}$ ($F = 4$) seviyesi dokuz alt $m_F = F + 1$ seviyelerine, $6S_{1/2}$ ($F = 3$) ise yedi alt m_F seviyesine ayrışır.

5.2. Cs Atomlarının D_2 Enerji Geçişinde Soğurum Spektrumu

Bu bölümde rezonans lazer ışınmasının atomik gaz ile etkileşimi sonucunda elde edilen Doppler soğurum spektrumları ile ilgili bilgiler ve sonuçlar sunulacaktır. Başka bir deyişle burada lazer – atom etkileşimi ile ilgili deneysel veriler anlatılacaktır.

Varsayalım ki, frekansı ω_L olan lazer demeti, içerisinde Cs atomları olan cam küvet içerisinde geçsin ve foto diyot ile algılsın. Bilindiği gibi temel E_1 ve üst E_2 enerji seviyelerine sahip atomlar \vec{v} hızı ile hareket ediyorsa bu atomlar Doppler etkisine göre lazer ışınması ile $\omega_L - \omega_0 = \vec{k} \cdot \vec{v}$ şartı sağlandığında etkileşime girer. \vec{v} ile

hareket eden atom, lazer ile $\omega_0 = \frac{E_2 - E_1}{h}$ frekans değerinde değil, $\vec{k} \cdot \vec{v}$ kadar farklı olan ω_L frekans değerinde etkileşime girer. $K = \frac{2\pi}{\lambda} n$

Burada;

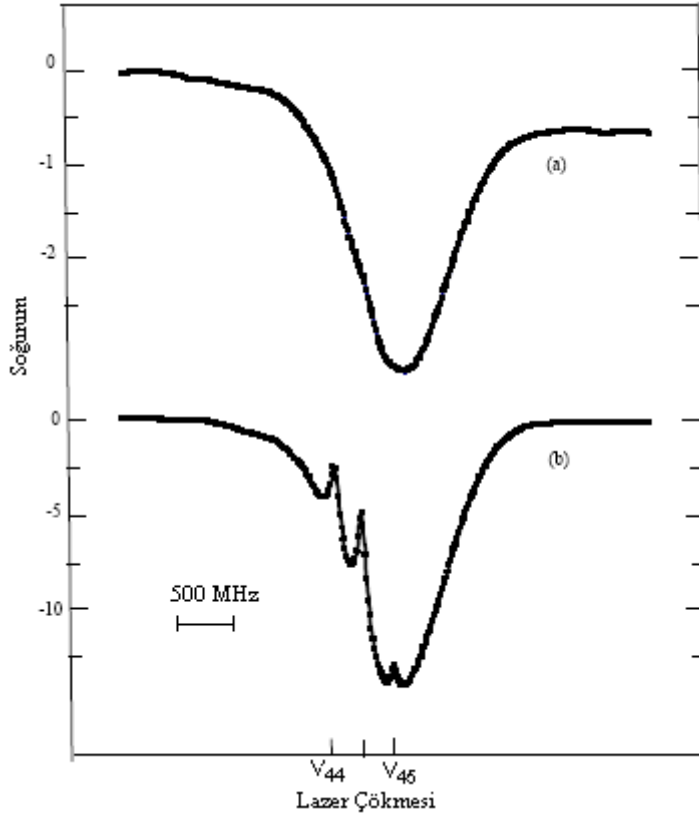
K: Lazerin dalga vektörü

λ : Lazerin dalga boyu

n : Lazer demeti yönünde birim vektörü

Oda sıcaklığında atomların küvet içindeki ortalama hız değerleri $v = 3 \times 10^4$ cm/sn'dir. Atomlar bu sıcaklık değerlerinde 10 m'den fazla mesafeyi çarpışmadan gidebilirler. Dolayısı ile çapı 2 cm ve uzunluğu 5 cm olan küvet içerisinde atomlar arası çarpışma ihmal edilebilir. Oda sıcaklığında küvet içerisindeki atomik gaz yoğunluğu 3×10^{10} atom/cm³ civarında olup hız dağılımı ise Maxwell – Boltzman hız dağılımı ile ifade edilmektedir. Atomların hız dağılımı, merkezi 3×10^4 cm/sn ve genişliği yaklaşık 3×10^4 cm/sn olan rezonans karakter göstermektedir. Eğer atomik küvetin girişindeki lazer gücü, lazer frekans değişimi ile sabit kaldığı varsayılırsa, bu durumda küvetin çıkışındaki lazer gücünde atomların hız dağılımına benzemektedir ancak ters işaretli olarak değişmektedir. Rezonans atomik gazdan geçen ve frekansı $\omega_L - \omega_0 = \vec{k} \cdot \vec{v}$ çevresinde değişen lazer ışınımını foto diyot ile algılandığında lazer frekans değişimine göre rezonans değişim gösteren sinyal algılanacaktır.

Şekil 5.3.(a) ve şekil 5.3.(b)'de deneysel olarak algılanan Doppler soğurum rezonansları verilmiştir. Şekil 5.3.(a)'da referans Cs küveti, şekil 5.3.(b)'de ise deneysel Cs küveti ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. Her iki durumda lazer frekansı atomların $6S_{1/2}$ (F = 4) - $6P_{3/2}$ (F = 5, 4, 3) geçişini tarayacak şekilde değiştirilmiştir. Deneysel Cs küvetinde lazer ışınımı (prob lazer demeti) bir tarafa doğru ilerlediği için doppler gözlenmiş oldu. Referans Cs küveti içinde ise prob lazer demetine karşı yayılan doyurucu pump demeti olduğu için Doppler soğurum spektrumu üzerinde daha ince Doppler içi rezonanslar gözlenmiştir. Doppler spektrumu atomların temel enerji seviyelerindeki hız dağılımına karşılık gelmektedir ve çizgi kalınlığı yaklaşık 500 MHz civarındadır.



Şekil 5.3. Cs küvetinde oluşan Doppler çökmeleri (a) Referans Cs küveti, (b) Deneysel Cs küveti

Doyurucu lazer demetinin etkisi ile lazer frekansı enerji geçişine denk geldiğinde atomların bir kısmı temel enerji seviyesinden $6S_{1/2} (F = 4)$ üst enerji seviyesine geçerler. Bu nedenle prob lazer demeti daha az atom ile etkileşime girer ve dolayısı ile daha çok soğurularak foto diyottaki sinyali artırır. Şekil 5.3.(b)'de V_{4-5} frekansına denk gelen bu rezonans artış veya ince gözlenen bu Doppler içi rezonans, atomların tam olarak $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 5)$ 'e denk gelmektedir. Normal şartlarda atomlar $6P_{3/2} (F = 5)$ $J = 30$ ns yaşarlar ve daha sonra spontan (kendiliğinden) olarak geri temel enerji seviyesine dönerler. $6P_{3/2} (F = 4)$ ve $6P (F = 3)$ seviyelerine çıkan atomlar ise bu seviyeden eşit ihtimal ile her iki seviye $6S_{1/2} (F = 4)$ ve $6S_{1/2} (F = 3)$ seviyelerine dönerler. Lazer frekansı $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 5, 4, 3)$ geçişlerini kapsayacak şekilde tarandığında lazer Doppler etkisi ile genişlemiş üç adet soğurum rezonansı daha doğrusu $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 5)$, $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 4)$ ve $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 3)$ enerji geçişlerine denk gelen üç rezonans algılar. Her bir rezonansın çizgi kalınlığı yaklaşık 500 MHz'dir. Ancak tepeleri arasındaki fark sırasıyla 250 MHz ve 200 MHz olduğundan

bu rezonansı tek Doppler rezonansı olarak gözlenir. Bu üç rezonansın genlikleri de birbirinden farklıdır. Optik pompalama etkisinin çok az olduğu durumda, bu rezonansların genlikleri her enerji geçişlerine denk gelen atom grubunun fotonları soğurma ihtimaline bağlıdır. $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 5)$, $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 4)$ ve $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 3)$ enerji geçişleri için bu geçiş ihtimal değerleri sırasıyla 0.45, 0.2, 0.07 olarak bilinmektedir. Dolayısı ile deneysel olarak gözlenen toplam Doppler soğurma spektrumu da aralarında sırasıyla 250 MHz ve 200 MHz olan ve genlikleri 0.45, 0.2 ve 0.07 ile orantılı üç spektrumun toplamıdır. Deneysel olarak gözlenen toplam Doppler spektrumuna optik pompalama yapmanın da etkisi çok büyüktür. $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesinden üst seviyeye çıkan atomlardan $6P_{3/2} (F = 5)$ çıkanlar $\Delta F = \pm 0.1$ prensibine göre $6S_{1/2} (F = 3)$ seviyesine gitmezler ve geri $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesine gelirler. $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 4)$ ve $6S_{1/2} (F = 3) - 6P_{3/2} (F = 3)$ geçişindeki atomlar için ise durum farklıdır. Çünkü bu geçişler açık geçişlerdir ve atomlar üst seviyeden hem geri çıktıkları temel seviyeye hem de fotonlar tarafından etkilenmeyecek diğer temel enerji seviyesi olan $6S_{1/2} (F = 3)$ seviyesine giderler. Bu grup atomların sayısı $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesinde azalır ve dolayısı ile bu grup atomların da gözlenen toplam Doppler spektrumunda onların etkisi ile iyice azalır. Optik pompalama olarak adlandırılan bu etmeden dolayı deneysel olarak gözlenen toplam Doppler spektrumu esas olarak $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 5)$ geçişine uygun gelen atom grubu ile belirlenir. Lazer ışığının gücü arttıkça $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesindeki atomlar daha etkin bir şekilde kullanılmayan diğer temel seviyeye yani $6S_{1/2} (F = 3)$ 'e pompalanırlar dolayısı ile esas kullanılan seviyede ($6S_{1/2} (F = 4)$) sayıları azalır. Bu sebeple referans Cs küvetinden algılanan Doppler soğurumu daha çok görünmüştür çünkü bu küvet içine gönderilen lazer gücü (0.5 mW) deney küvetine gönderilenden on kat daha azdır. Ayrıca bu etken deney küvetinden gözlenen spektrumun azda olsa doğrusal şekle sahip arka fon üzerinde olması ile kendisini göstermektedir. Doğrusal olarak gözlenen arka fon değişiminin sebebi şu şekilde açıklanabilir;

Lazer frekans değişimi, lazer akımındaki değişim ile (1 GHz/1 mA) yapılmaktadır. Lazer frekansını yaklaşık 1 GHz artırmak için lazer akımı 1 mA azaltılır ve değişim lazer gücünü, dolayısı ile foto diyottaki sinyali doğrusal olarak azaltır.

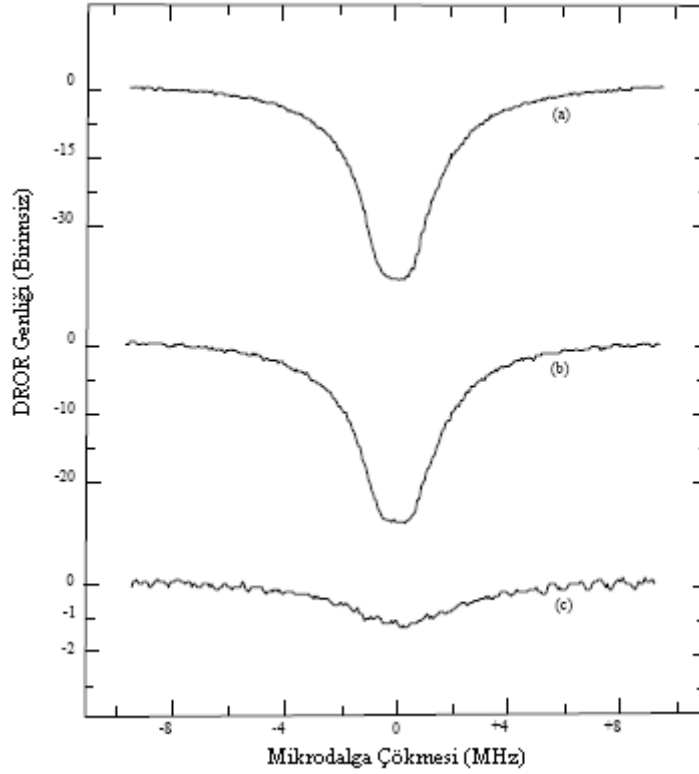
5.3. Uzak Alan Şartlarında Lazer – Atom – Mikrodalga Etkileşimi Sonucunda Gözlenen Radio – Optik Rezonans

Önceki bölümde anlatıldığı gibi lazer frekansı Cs atomlarının $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 4)$ enerji geçişlerine ayarlandığı zaman deneysel küvet içindeki atomlar, $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesinden $6P_{3/2} (F = 4)$ olan üst seviyeye çıkarlar ve oradanda spontan olarak bu atomların bir kısmı geri $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesine, diğer kısmı ise kullanılmayan $6S_{1/2} (F = 3)$ seviyesine giderler. Bu optik depolama sonucunda da temel seviye olan $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesindeki atom sayısı azalır. Bu optik pompalama sonucunda da $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesinde atom sayısı azalır ve bu seviyeden $6P_{3/2} (F = 4)$ seviyesine ayarlanan lazer soğurumu da azalır. Sabit lazer frekans değerinde ve sabit lazer gücünde bu işlem yaklaşık 150 ps zaman aralığında dengeye gelir. Dolayısı ile Cs çalışma küvetinin içinden geçen sabit frekanslı ve sabit güçlü lazerin foto diyot üzerinde algılanması sonucunda zaman içinde değişmeyen sabit sinyal algılanır.

Bu şartlar altında Cs çalışma küvetinin üzerine mikrodalga gönderildiğini varsayalım. Bu mikrodalganın frekansı iki temel seviye olan $6S_{1/2} (F = 3)$ ve $6S_{1/2} (F = 4)$ arasına denk gelen frekansını (Ω_0) içerecek şekilde yaklaşık ± 10 MHz tarandığını varsayalım. Mikrodalga frekansı Ω_0 'a denk geldiğinde $6S_{1/2} (F = 3)$ alt seviyedeki atomlar mikrodalga ışımalarının fotonunu soğurarak üst seviye olan $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesine geçerler. Bu geçiş sonucunda $6S_{1/2} (F = 4)$ seviyesindeki atomların sayısı azaldığı için $6S_{1/2} (F = 4) - 6P_{3/2} (F = 4)$ geçişine ayarlanmış lazerin soğurumu artacaktır. Mikrodalga frekansı Ω_0 çevresinde tarandığında Cs deneysel küvetinden geçen lazerin soğurum rezonansı artış göstermektedir. Tez çalışması kapsamında deneysel olarak gözlenen radio – optik rezonanslar şekil 5.3.(b)'de verilmiştir. Deney düzeneği şeması (Bkz. Şekil 4.2), deney düzeneği açıklaması ise bölüm 4'de anlatılmıştır.

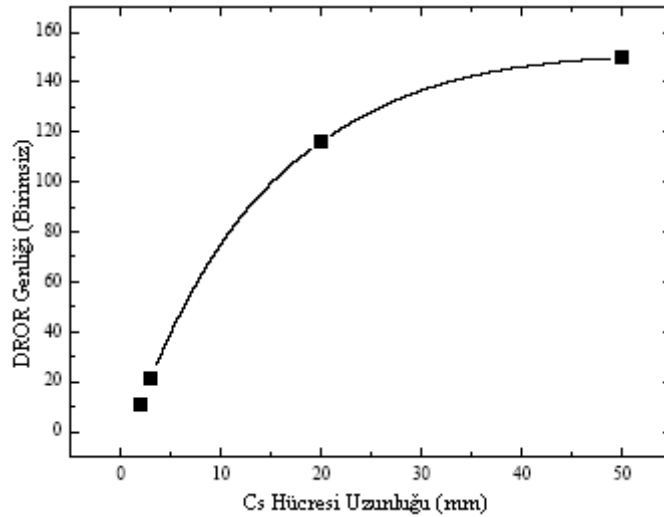
Horn anten Cs çalışma küvetinden 1 m mesafeye yerleştirilmiştir. Bu mesafe, uzak alan şartı olan $2D^2 / \lambda$ mesafesinden daha büyüktür. 5 cm, 2 cm ve 3 mm uzunluğundaki üç farklı küvetin kullanımı ile elde edilen radio – optik rezonans

(Double radio – optical resonance (DROR)) spektrumları sırası ile şekil 5.4.(a), şekil 5.4.(b), ve şekil 5.4.(c)'de verilmiştir.



Şekil 5.4. Cs hücresinin boyutlarına göre DROR sinyaline ait spektrum (a) 50 mm, (b) 20 mm, (c) 3mm

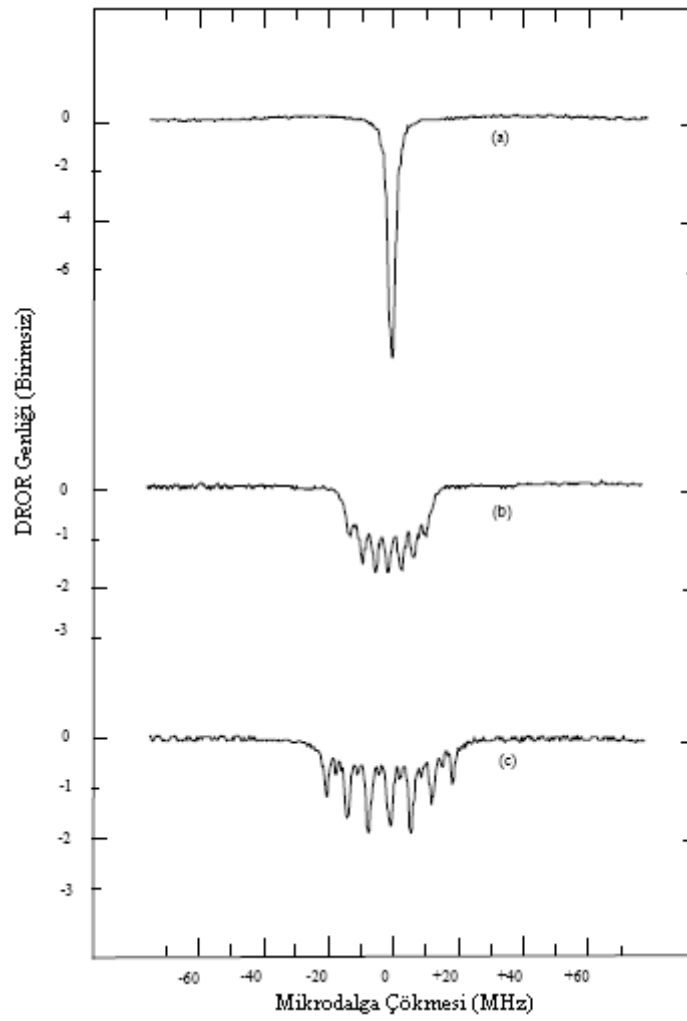
Küvet uzunluğu azaldıkça lazer soğurumu da $P = P_0 e^{-\alpha l}$ bağıntısı ile orantılı olarak azaldığı için radio – optik rezonansın genliği de azalmıştır. Küvet boyutuna göre radio – optik rezonansın değişim analizinin sonuçları şekil 5.5’de ki gibidir.



Şekil 5.5. Farklı boyutlardaki Cs hücrelerinin DROR varyasyonu

Radio – optik rezonansları beklendiği gibi mikrodalga $\Omega_0 = 9.192631770$ GHz frekans değerinde gözlenmiştir. Spektrumlar oda sıcaklığında ($n = 3 \times 10^{10}$ atom/cm³), kuvvet girişinde lazer gücünün 3 mW değerinde elde edilmiştir. Kuvvet üzerine uygulanan mikrodalga manyetik alan değeri ise bu deneylerde 3 A/m olarak hesaplanmıştır. Gözlenen radio – optik rezonansların çizgi kalınlığının 50 mm küvette 2.98 MHz, 20 mm küvette 3.14 MHz ve 3 mm küvette ise 4.82 MHz olduğu tespit edilmiştir. Rezonansların çizgi kalınlığının artışı atom – mikrodalga etkileşim boyutunun değişimine dolayısı ile etkileşim süresine bağlı olması ifade edilebilir. Ayrıca bu genişlemeye kuvvet boyutundan dolayı lazer gücündeki değişiminde etkisi varsayılabilir.

Uzak alan ve serbest uzay şartlarında ilk defa gözlenen radio – optik rezonansların dış manyetik alanının etkisi ile Zeeman yarılmalari da deneysel olarak araştırılmıştır. Bu deneylerde kuvvet içinde lazer ışınması yönünde Helmholtz sargıları kullanımı ile 6.5 G (Gauss) ve 10.5 G değerinde sabit manyetik alan oluşturulmuştur. Dış manyetik alanın etkisi ile Zeeman yarılmalara ayrılmış radio – optik rezonanslar şekil 5.6.(a), şekil 5.6.(b) ve şekil 5.6.(c) 'de verilmiştir.



Şekil 5.6. Manyetik alan altında Zeeman spektrumları (a) $< 0.2\text{ G}$, (b) 6.5 G , (c) 10.5 G

Şekilde görüldüğü gibi sabit manyetik alan $6S_{1/2}$ ($F = 4$), $6S_{1/2}$ ($F = 3$), $6S_{1/2}$ ($F = 2$) ve $6P_{3/2}$ ($F = 4$) seviyelerini Zeeman alt seviyelerine ayırtmıştır. Ayrışma manyetik alanın artması ile artış göstermiştir. Bu nedenle dış manyetik alanının olmadığı durumdaki simetrik radio – optik rezonans, manyetik alanının etkisi ile alt Zeeman radio – optik rezonanslara bölünmüştür.

BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışma kapsamın da, elektromanyetik alan ölçümü, uygulamaları ve lazer spektroskopisi ile ilgili literatür çalışması yapılarak elektromanyetik metrolojisinde önemli olan ve lazer – atom – mikrodalga – etkileşimi, uzak alan ve serbest uzay şartlarında deneysel olarak ilk defa gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Lazer – atom – mikrodalga etkileşiminin araştırılması için gerekli deney düzenekleri kurulmuştur.
- Uzak alan ve serbest uzay şartlarında Cs atomlarının D_2 enerji geçişinde radio – optik spektral rezonansı gözlenmiş ve farklı kuvvet boyutlarında, dış manyetik alan değerlerinde araştırılmıştır.

Uzak alan şartlarında radio-optik spektrumunun deneysel olarak gözlenmesi, mikrodalga alanının lazer spektroskopisi yöntemi ile analizine yeni imkanlar tanımaktadır. Çalışmalar sırasında elde edilen deneysel veriler esas alınarak geleceğe yönelik aşağıdaki çalışmalar yapılabilir:

- Radio-optik rezonansına lazer ve mikrodalga ışımalarının güç ve polarizasyon etkilerinin araştırılması.
- Genliği modüle edilmiş mikrodalga ışımalarının etkisi ile radio - optik rezonansının gözlenmesi ve modülasyonlu radio – optik rezonans parametrelerinin araştırılması.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ve ileriye yönelik verilen öneriler, mikrodalga alan algılayıcılarının geliştirilmesine ve elektromanyetik dalga genliğinin lazer spektroskopisi yöntemleri ile analiz edilmesine imkan sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] ZIBROV, A. S., ZHUKOV, A. A., YAKOVLEV, V. P., VELICHANSKY, V. L., Shape of the signal of double radio-optical resonance in ^{85}Rb atomic vapors in strong fields, JETP Letters, Vol. 83, No. 4, pp. 136-140, 2006.
- [2] LITVINOV, A., KAZAKOV, B., MATISOV, B., MAZETS, I., Double radio-optical resonance in ^{87}Rb atomic vapour in a finite-size buferless cell, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 41, 125401, (8pp), 2008.
- [3] BUDKER, D., HOLBERG, L., KIMBALL, D. F., KITCHING J., PUSTELNY, S., YASHCHUK, V. V., Microwave transitions and nonlinear magneto-optical rotation şn anti-relaxation-coated cells, Physical Review A, 71, 012903, 2005.
- [4] IEEE Electromagnetic Compatibility Society, IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz, (Revision of IEEE Std 1309 – 1996), IEEE, (2005)
- [5] A Guide to power flux density and field strength measurement, NPL, 2004
- [6] IEEE Antenna Standards Committee, and Boles, M., A., ANSI/IEEE Std 149-1979 IEEE Standard Test Procedures for Antennas, (Revision of IEEE Std 149- 1965), IEEE, (1979).
- [7] BORN, M., WOLF E., Principles of Optics, 4 th Edition. Oxford, 1970
- [8] ÖZKAN, A., Optoelektronik devreler ve düzenler. Y.T.Ü., 2002
- [9] SERPENGÜZEL, A., Yarıiletken diyot lazerlerinde kendiliğinden salınımın kuvvetlendirilmesi, Bilkent Üniversitesi, TBAG-1368, Ankara, 1999.
- [10] DEMTRÖDER, W., Laser Spectroscopy, 2 nd Edition. Germany, 1996.
- [11] PAULUSSE, D., ROWELL, N., MICHAUD, A., Realization of a atomic microwave power standard, Proc. Conf. on Precision Electromagnetic Measurements, Ottawa, Ontario, Canada, 16 - 21 June, 2002, pp. 194-195.

- [12] CROWLEY, T. P., DONLEY, E. A., HEAVNER, T. P., Quantum-based microwave power measurements: Proof-of-concept experiment, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 75, No.8, August 2004, pp. 2575 – 2580.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Kayseri'nin Yeşilhisar ilçesi Musahacılı köyünde doğan Osman ŞEN, ilk ve orta öğrenimini Musahacılı köyünde, lise öğrenimini ise Kayseri' de tamamladı. 2003 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimini tamamladı. 2007 yılı güz döneminde Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü' nde yüksek lisans öğrenimine başladı. 2005 yılından itibaren TÜBİTAK UME – EMC laboratuvarında araştırmacı olarak görev yapmaktadır.