

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**He-Ne / I₂ (633 nm) LAZER FREKANS KARARLILIĞI
VE MUTLAK FREKANS ÖLÇÜMÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Fizikçi Ersoy ŞAHİN**

**Anabilim Dalı: Fizik Mühendisliği
Programı: Fizik Mühendisliği**

ŞUBAT 2006

**He-Ne / I₂ (633 nm) LAZER FREKANS KARARLILIĞI
VE MUTLAK FREKANS ÖLÇÜMÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Fizikçi Ersoy Şahin
(509031103)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 Aralık 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Şubat 2006**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr.Gönül ÖZEN
Dr.Ramiz HAMİD(TÜBİTAK-UME)**

**Jüri Üyeleri Prof.Dr. Nurfer GÜNGÖR
Prof.Dr. Alpan SENNAROĞLU(KOÇ ÜNV.)
Doç.Dr. Cenap Ş. ÖZBEN**

ŞUBAT 2006

ÖNSÖZ

Tez çalışmasının gerçekleşmesi aşamasında emeği geçen kişilere , ayrıca tez çalışma süreci boyunca büyük sabır gösteren eşim Necla'ya teşekkür ederim. Bu çalışmayı oğlum Yusuf 'a atfediyorum.

17.02.2006

Ersoy Şahin

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	iii
TABLO LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. LASER	2
2.1. Radyasyonun Salınması ve Soğurulması	2
2.2. Lazer Işığının Özellikleri	5
2.2.1. Paralel ışık demet özelliği	5
2.2.2. Monokromatiklik	5
2.2.3 Koherentlik özelliği	6
2.3. Boltzman Dağılımı	11
2.4. Nüfus Tersinmesi	12
2.5. Çizgi Fonksiyonu	13
2.6. He-Ne Lazeri	14
3. LAZER SPEKTROSKOPİSİ	17
3.1.1. Doppler genişlemesi	18
3.1.2. Hole burning ve bennet boşluğu	22
3.1.3. Lamb çökmesi	24
3.2. Bağımsız Doppler Rezonanslarının Genişlemesine Sebebi Olan etkenler	26
3.2.1. Atomik gaz basıncı	26
3.2.2. Transit zaman genişlemesi	27
3.3. Frekans Kararlılığının Temel Prensipleri	28
3.4. Optik Frekans Standartları	29
4. DENEY DÜZENİĞİ VE ÖLÇÜM SONUÇLARI	33
4.1. He-Ne / I ₂ (633 nm) Lazer Frekans Standardı Ölçüm Sistemi	33
4.2. Lazer Frekansına Etki Eden Parametrelerin Araştırılması	41
4.2.1. He-Ne/I ₂ (UME L1) Lazer frekans parametrelerin araştırılması	42
4.2.2. He-Ne/I ₂ (UME L2) Lazer frekans parametrelerin araştırılması	44
4.2.3. He-Ne/I ₂ (UME L3) Lazer frekans parametrelerin araştırılması	46
4.3. He-Ne/I ₂ (UME L1,UME L2,UME L3) Frekans Kararlılığı Araştırılması	48
4.4. Mutlak Frekans Ölçümü	52
4.5. He-Ne/I ₂ (UME L3) Mutlak Frekans Ölçümü	54
5. DENEY SONUÇLARI	57
KAYNAKLAR	59

EKLER

60

ÖZGEÇMİŞ

63

KISALTMALAR

UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
BIPM	: Uluslararası Ölçüm Bürosu
CIPM	: Uluslararası Ölçüm Komitesi
UME L1	: Ulusal Metroloji Enstitüsü 1 nolu He-Ne / I ₂ lazeri
UME L2	: Ulusal Metroloji Enstitüsü 2 nolu He-Ne / I ₂ lazeri
UME L3	: Ulusal Metroloji Enstitüsü 3 nolu He-Ne / I ₂ lazeri
BIPM4	: Uluslararası Ölçüm Bürosu 4 nolu He-Ne / I ₂ lazeri
BIW167	: Uluslararası Ölçüm Bürosu He-Ne / I ₂ lazeri

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Bazı Çok Kullanılan Lazerlerin Ahenk Mesafeleri.....	10
Tablo 3.1. Karakök Allan Varyans Hesaplamısındaki Veriler.....	31
Tablo 4.1. Sıcaklık Kontrol Sistemi Devre Elemanları Değerleri.....	37
Tablo 4.2. Lag-Lead Filtre Devre Elemanları Değerleri.....	38
Tablo 4.3. İntegrator Devre Elemanları Değerleri.....	39
Tablo 4.4. He-Ne /I ₂ (UME L1)Lazer Frekans Paremetre Değişimi.....	43
Tablo 4.5. He-Ne /I ₂ (UME L2)Lazer Frekans Paremetre Değişimi.....	45
Tablo 4.6. He-Ne /I ₂ (UME L3)Lazer Frekans Paremetre Değişimi.....	47

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 :Atomların Uyarılması	3
Şekil 2.2 :Soğurma, Kendiliğinden Salma, Uyarılmış Salma	4
Şekil 2.3 :Üç Seviyeli Sistemde Lazerin Enerji Seviyeleri	6
Şekil 2.4 :Ahengin Gösterilmesi	8
Şekil 2.5 :Girişim Gösterilmesi	9
Şekil 2.6 :İki Enerji Seviyeli Sistemin Sonrası Nüfusları	12
Şekil 2.7 :Enerji Seviyeleri Arasındaki Geçişler ,Geçirme ve Soğurm Eğrisi	14
Şekil 2.8 :He-Ne Lazeri	15
Şekil 2.9 :He-Ne Lazeri Enerji Seviyeleri	16
Şekil 3.1 :Elektromanyetik Dalganın Atom Tarafından Soğurumu	18
Şekil 3.2 :Maxwell Dağılımınca Atom Sayısının Hızlarına Göre Değişimi	19
Şekil 3.3 :Cam Küvet İçindeki Atomik Gazla Etkileşime Giren Işın Demeti	20
Şekil 3.4 :Lazer Işık Şiddetinin Atomların Hızlarına Göre Değişimi	20
Şekil 3.5 :Atomun Hızından Dolayı Oluşan Doppler Genişlemesi	21
Şekil 3.6 :Atomlarla Etkileşime Giren iki Farklı Lazer Demeti	22
Şekil 3.7 :Lazer1 Işığının Atomlar Tarafından Soğrulmasında Oluşan grafik	23
Şekil 3.8 :Doppler Soğurma Spektroskopisinde Oluşan “Bennet çökmesi”	23
Şekil 3.9 :Alt-Doppler Doyum Rezonansları	25
Şekil 3.10 :Bir Lazer Demetiyle Elde Edilen Bennet Çökmeleri	25
Şekil 3.11 :Rezonans Frekansta Oluşan Lamp Çukuru	26
Şekil 3.12 :Lazerlerin Frekans Kilitlenmesinin Temel Konfigurasyonu	28
Şekil 3.13 :Atomik / moleküler Geçişlere Kilitli Lazer Sistemi Blok Şeması	30
Şekil 3.14 :Allan Variance’ ın Zamana Göre Değişim Grafiği	30
Şekil 4.1 :Lazer Ünite Yapısı	34
Şekil 4.2 :Lazer Ünite Yapısı	34
Şekil 4.3 :Sıcaklık Kontrol Sistemi Elektronik Şeması	37
Şekil 4.4 :Lag-Lead Filtre Elektronik Şeması	38
Şekil 4.5 :İntegratör Elektronik Şeması	39
Şekil 4.6 :HV-HC Yükseltici Elektronik Şeması	40
Şekil 4.7 :HV-LC Yükseltici Elektronik Şeması	40
Şekil 4.8 :İyot Molekülleri Enerji Geçiş	41
Şekil 4.9 :Beat Ölçüm Düzenegi	41
Şekil 4.10 :UME L1 Basınç Değişimi	42
Şekil 4.11 :UME L1 Modülasyon Genişliği	42
Şekil 4.12 :UME L1 Lazer Optik güç	43
Şekil 4.13 :UME L2 Basınç Değişimi	44
Şekil 4.14 :UME L2 Modülasyon Genişliği	51
Şekil 4.15 :UME L2 Lazer Optik güç	45
Şekil 4.16 :UME L3 Basınç Değişimi	46
Şekil 4.17 :UME L3 Modülasyon Genişliği	53
Şekil 4.18 :UME L3 Lazer Optik	47

Şekil 4.19	:UME L3(e)-UME l(d)Frekans Kararlılığı	48
Şekil 4.20	:UME L3(e)-UME 2(d) Frekans Kararlılığı	49
Şekil 4.21	:UME L3(e)-BIPM4(f), Frekans Kararlılığı	50
Şekil 4.22	:UME L3(e)-BIW167(f) Frekans Kararlılığı	51
Şekil 4.23	:UME L3 Frekans Kararlılığı	52
Şekil 4.24	:Optik Frekans Zinciri	53
Şekil 4.25	:Femtosaniye Lazer Comb	54
Şekil 4.26	:BIPM Ölçüm Düzeneği	55
Şekil 4.27	:UME Ölçüm Düzeneği	55
Şekil 4.28	:Mutlak Frekans Ölçümü(BIPM)	56
Şekil 4.29	:Mutlak Frekans Ölçümü(UME)	56

UME L2 Basınç Değişimi

UME L2 Modülasyon Genişliği

UME L2 Lazer Optik güç

UME L3 Basınç Değişimi

UME L3 Modülasyon Genişliği

UME L3 Lazer Optik

Şekil 2.1	:Atomların Uyarılması	3
Şekil 2.2	:Soğurma, Kendiliğinden Salma, Uyarılmış Salma	4
Şekil 2.3	:Üç Seviyeli Sistemde Lazerin Enerji Seviyeleri	6
Şekil 2.4	:Ahengin Gösterilmesi	8
Şekil 2.5	:Girişim Gösterilmesi	9
Şekil 2.6	:İki Enerji Seviyeli Sistemin Sonrası Nüfusları	12
Şekil 2.7	:Enerji Seviyeleri Arasındaki Geçişler ,Geçirme ve Soğurm Eğrisi	14
Şekil 2.8	:He-Ne Lazeri	15
Şekil 2.9	:He-Ne Lazeri Enerji Seviyeleri	16
Şekil 3.1	:Elektromanyetik Dalganın Atom Tarafından Soğurumu	18
Şekil 3.2	:Maxwell Dağılımınca Atom Sayısının Hızlarına Göre Değişimi	19
Şekil 3.3	:Cam Küvet İçindeki Atomik Gazla Etkileşime Giren Işın Demeti	20
Şekil 3.4	:Lazer Işık Şiddetinin Atomların Hızlarına Göre Değişimi	20
Şekil 3.5	:Atomun Hızından Dolayı Oluşan Doppler Genişlemesi	21
Şekil 3.6	:Atomlarla Etkileşime Giren iki Farklı Lazer Demeti	22
Şekil 3.7	:Lazer1 Işığının Atomlar Tarafından Soğrulmasında Oluşan grafik	23
Şekil 3.8	:Doppler Soğurma Spektroskopisinde Oluşan “Bennet çökmesi”	23
Şekil 3.9	:Alt-Doppler Doyum Rezonansları	25
Şekil 3.10	:Bir Lazer Demetiyle Elde Edilen Bennet Çökmeleri	25
Şekil 3.11	:Rezonans Frekansta Oluşan Lamp Çukuru	26
Şekil 3.12	:Lazerlerin Frekans Kilitlenmesinin Temel Konfigurasyonu	28
Şekil 3.13	:Atomik / moleküler Geçişlere Kilitli Lazer Sistemi Blok Şeması	30
Şekil 3.14	:Allan Variance’ın Zamana Göre Değişim Grafiği	30
Şekil 4.1	:Lazer Ünite Yapısı	34

Şekil 4.2	:Lazer Ünite Yapısı	34
Şekil 4.3	:Sıcaklık Kontrol Sistemi Elektronik Şeması	37
Şekil 4.4	:Lag-Lead Filtre Elektronik Şeması	38
Şekil 4.5	:İntegratör Elektronik Şeması	39
Şekil 4.6	:HV-HC Yükseltici Elektronik Şeması	40
Şekil 4.7	:HV-LC Yükseltici Elektronik Şeması	40
Şekil 4.8	:İyot Molekülleri Enerji Geçişi	41
Şekil 4.9	:Beat Ölçüm Düzenegi	41
Şekil 4.10	:UME L1 Basınç Değişimi	42
Şekil 4.11	:UME L1 Modülasyon Genişliği	42
Şekil 4.12	:UME L1 Lazer Optik güç	43
Şekil 4.13	:UME L2 Basınç Değişimi	44
Şekil 4.14	:UME L2 Modülasyon Genişliği	51
Şekil 4.15	:UME L2 Lazer Optik güç	45
Şekil 4.16	:UME L3 Basınç Değişimi	46
Şekil 4.17	:UME L3 Modülasyon Genişliği	53
Şekil 4.18	:UME L3 Lazer Optik	47
Şekil 4.19	:UME L3(e)-UME l(d)Frekans Kararlılığı	48
Şekil 4.20	:UME L3(e)-UME 2(d) Frekans Kararlılığı	49
Şekil 4.21	:UME L3(e)-BIPM4(f), Frekans Kararlılığı	50
Şekil 4.22	:UME L3(e)-BIW167(f) Frekans Kararlılığı	51
Şekil 4.23	:UME L3 Frekans Kararlılığı	52
Şekil 4.24	:Optik Frekans Zinciri	53
Şekil 4.25	:Femtosaniye Lazer Comb	54
Şekil 4.26	:BIPM Ölçüm Düzenegi	55
Şekil 4.27	:UME Ölçüm Düzenegi	55
Şekil 4.28	:Mutlak Frekans Ölçümü(BIPM)	56
Şekil 4.29	:Mutlak Frekans Ölçümü(UME)	56

Optik Frekans Zinciri
Femtosaniye Lazer Comb
BIPM Ölçüm Düzenegi

UME Ölçüm
Düzenegi
Mutlak Frekans
Ölçümü(BIPM
)

Mutlak Frekans Ölçümü(BIPM)

Mutlak Frekans 3
Ölçümü(UME 4
) 6
8
9
12
14
15
16
18
19
20
20
21
22
23
23
25
25
26
28
30
30
34
34
37
38
39
40
40

41
41
42
42
43
44
51
45
46
53
47
48
49
50
51
52
53
54
55
55
56
56

SEMBOL LİSTESİ

α	: Soğurum katsayısı
I	: Işık şiddeti
k	: Dalga vektörü
ω	: Açısal frekans
c	: Işık hızı
ν	: Frekans
γ	: Frekans bant genişliği
E	: Enerji seviyesi
m	: Kütle
ω_L	: Lazer frekansı
N_0	: Atom sayısının ortalama hızdaki maksimum sayısı
$\Delta\omega_D$	: Doppler çizgi kalınlığı
$\sigma(\tau)$	: Allan varyansın karakökü
τ	: Atomun üst enerji seviyesinde doğal yaşama süresi
τ_c	: Atomlar arası çarpışma süresi
N_i	: Etkileşim öncesi temel enerji seviyesinde bulunan atom yoğunluğu
c	: Işık hızı
h	: Planck sabiti
t_c	: Ahenk Zamanı
ν	: Frekans
λ	: Ortamdaki ışığın dalga boyu
τ_{21}	: Uyarılmış halin ömrü
A_{21}	: Kendiliğinden geçiş oranı
L_c	: Dalga treni boyu
$\Delta\nu$	: Çizgi genişliği
N	: Birim hacimdeki atom sayısı (popülasyon)
k	: Boltzman sabiti
σ	: Tesir alanı
T	: Mutlak sıcaklık
N_2	: İkinci enerji seviyesindeki atom sayısı
N_1	: Birinci enerji seviyesindeki atom sayısı
B_{21}	: Einstein sabiti
$g(\nu)$	: Çizgi fonksiyonu
e	: Elektron yükü

Üniversitesi	: İstanbul Teknik Üniversitesi
Enstitüsü	: Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	: Fizik Mühendisliği
Programı	: Fizik Mühendisliği
Tez Danışmanı	: Prof. Dr. Gönül ÖZEN - Dr. Ramiz HAMİD
Tez Türü ve Tarihi	: Yüksek Lisans – Şubat 2006

ÖZET

He-Ne / I₂ (633 nm) LAZER FREKANS KARARLILIĞI Ve MUTLAK FREKANS ÖLÇÜMÜ

Ersoy ŞAHİN

Bu çalışmada Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)'de dizayn ve yapımı gerçekleştirilen 3 adet He-Ne / I₂ (UME L1,UME L2,UME L3) lazerlerinin frekansına etki eden parametreler (iyot molekülleri gaz basıncı, lazere uygulanan modülasyonun çizgi genişliği ve lazer gücü) parametreleri incelenmiştir. Lazerlerin kendi aralarındaki frekans kararlılığı ve Uluslararası Ölçüm Bürosu (BIPM) lazerleri(BIPM4, BIW167) ile UME L3'ün frekans kararlılığı araştırılmış ve UME L3'ün iyot molekülleri enerji geçişi (f çizgisi) mutlak frekansı BIPM ve UME Femtosaniye Comb sistemi ile olan ölçüm ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler:Lazer frekans kararlılığı, Lazer mutlak frekansı, Femtosaniye Comb

Bilim Dalı Sayısal Kodu: 404.01.01

University : İstanbul Technical University
Institute : Institute of Science and Technology
Science Programme : Physics Engineering
Programme : Physics Engineering
Supervisor : Prof. Dr. Gönül ÖZEN – Dr. Ramiz HAMİD
Degree Awarded and Date : Master of Science – February 2006

ABSTRACT

He-Ne / I₂ (633 nm) LASER FREQUENCY STABILITY and ABSOLUTE FREQUENCY MEASUREMENT

Ersoy ŞAHİN

In this thesis work, the parameters that influence the laser frequency of 3 completely home-built He-Ne / I₂ (UME L1, UME L2, UME L3) such as gas pressure of the iodine molecules , laser modulation linewidth and laser power was investigated. Laser frequency stabilities between the UME –UME lasers and UME – BIPM (Bureau Internationale des Poids et Mesures) (BIPM4 and BIW167) lasers was demonstrated. Finally, Absolute frequency measurement of the UME L3 He-Ne laser that is frequency stabilized on the f-component of the iodine molecules have been done using both the BIPM and the UME femtosecond comb systems.

Key Words: Laser frequency stability, Laser Absolute Frequency, Femtosecond Comb.

Science Code: 404.01.01

1. GİRİŞ

Bilim ve teknoloji dünyasındaki gelişmeler insanlığa yeni değerler katmıştır. Bu değerlerden biride lazerdir. Bilindiği gibi lazerler bilim ve teknolojinin bir çok alanında kullanılmaktadır. Metroloji bilim dalında lazerler zaman ve uzunluk ölçeğinin oluşturulmasında kullanılırlar.

Uluslararası Ölçüm Komitesi (CIPM) metrenin tanımı (ışığın $1 / c$ sn ,de aldığı yol 1m olarak tanımlamıştır) ve uzunluk dalgaboyu standardı olarak kullanılacak lazer (He-Ne / I_2 (633 nm) Nd:Yag / I_2 (532 nm) gibi dalga boylarını belirlemiştir. Uluslararası Ölçüm Komitesi (CIPM) uzunluk dalgaboyu standardı olarak kullanılacak lazerler için, belirlenen enerji geçişlerine kilitlenme ve mutlak frekansı belirli değerler arasında bulunma koşulunu getirmiştir. Uzunluk dalga boyu standardı olarak kullanılacak lazer dalga boyları enerji geçişlerine kilitlenmek suretiyle hem frekans kararlılığı hemde belirli mutlak frekans değerinde bulunması sağlanır.

Uzunluk dalgaboyu standarlarından biri olan He-Ne / I_2 (633 nm) lazeri için bu tanım şöyledir ; 15 °C’de(17.3 pascal) iyot moleküllerinin R(127) 11-5 enerji geçişlerinden (d, e, f, g, h, i, j) geçişlerinden birine kilitli, lazerin gücü 50 μ W’den büyük ve lazeri iyot moleküllerinin R(127) 11-5 enerji geçişlerinden (d, e, f, g, h, i, j) kilitlemek için lazere uygulanan modülasyon çizgi genişliğinin 6 MHz olma zorunluluğunu getirmiştir. [1]. Son yıllarda uzunluk dalga boyu olarak kullanılacak lazer için (He-Ne / I_2) mutlak frekans ölçüm tanımı iyot mollekülleri enerji geçişlerinden f çizgisi için tanımlanmış ve bu değer. $473\,612\,353\,604.0 \pm 10.0$ kHz dir.

Bu tez çalışmasında Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)’de dizayn ve yapımı gerçekleştirilen 3 adet He-Ne / I_2 (UME L1, UME L2, UME L3) lazerlerinin frekansına etki eden parametreler (iyot mollekülleri gaz basıncı,lazere uygulanan modülasyonun çizgi genişliği ve lazer gücü) parametreleri incelenecek, lazerlerin kendi aralarındaki frekans kararlılığı ve Uluslararası Ölçüm Bürosu (BIPM) lazerleri(BIPM4, BIW167) ile UME L3’ün frekans kararlılığı araştırılacak ve son

olarak UME L3'ün iyot mollekülleri enerji geçişinin (f çizgisi) mutlak frekansının BIPM ve UME Femtosaniye Comb sistemi ile olan ölçüm ve sonuçları karşılaştırılacaktır.

2. LASER

Laser kelimesi ‘Radyasyonun Uyarılmış Salınması Yoluyla Işığın Şiddetlendirilmesi’ (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) anlamına gelen bir kısaltmadır. Albert Einstein 1917 yılında uyarılmış atom salma işleminin var olması gerektiğini göstermiştir. Fakat ilk olarak 1960 yılında T.H. Maiman yakutta optik frekanslarda bir lazer çalıştırmayı başarmıştır [2].

2.1. Radyasyonun Salınması ve Soğurulması

Atomdaki bir elektron iki enerji seviyesi arasında geçiş yaparsa ya bir foton salar veya soğurur. Bu $\Delta E/h = \nu$ frekanslı bir foton dalgasını gösterir (ΔE seviyeler arasındaki enerji farkını gösterir). Şekil 2.1.’de farazi olarak gösterilen atomik sistemin iki enerji seviyesi arasında elektron geçişleri olduğunu varsayalım. Eğer elektron E_1 düşük enerji seviyesindeyse bu durumda ($E_2 - E_1$)’lik enerjiye sahip fotonların varlığında bu elektron bir foton soğurarak E_2 üst enerji seviyesine geçebilir. Alternatif olarak eğer elektron E_2 seviyesindeyse bir foton salarak taban seviyeye inebilir. Salma işlemi iki farklı yolla olabilir. Bunlar: (a) elektronun tamamen rasgele yolla düşük seviyeye inmesi işlemi olan kendiliğinden salma ve (b) elektronun ($E_2 - E_1$) enerjili fotonların varlığıyla geçiş için tetiklendiği işlem olan uyarılmış salma işlemidir. Bu işlemde gizemli bir yan yoktur. Çünkü elektron er veya geç bu işlemi rasgele yapacaktır. Geçiş basitçe uyarıcı foton varlığıyla başlar.

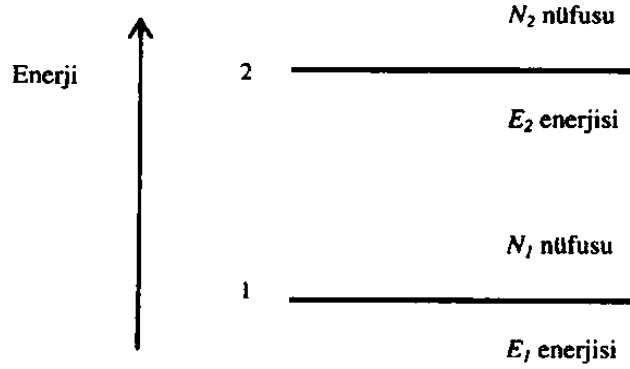
$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

h =Planck sabiti ($6.64 \cdot 10^{-34}$ Js)

c =ışık hızı ($3 \cdot 10^8$ m/s)

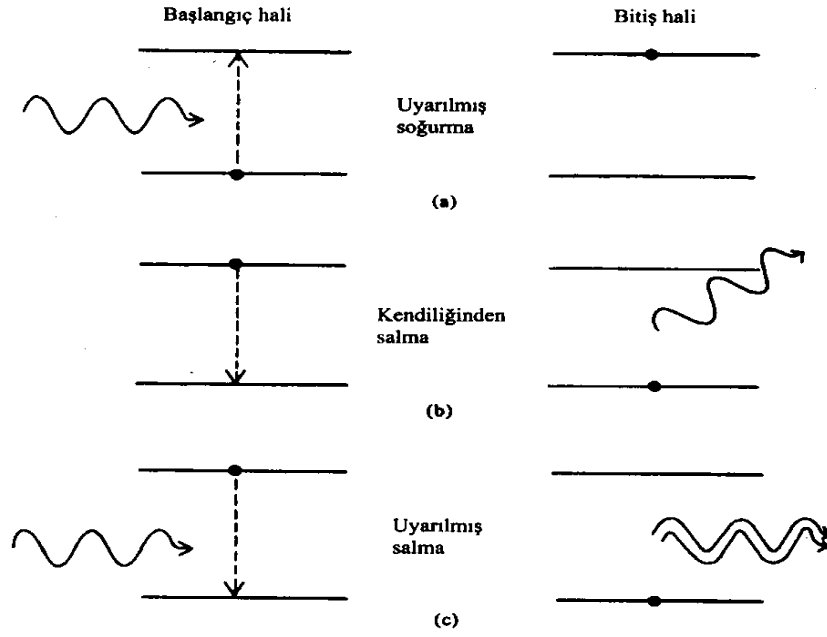
ν =yayınlanan ışığın frekansı (Hz)

λ =yayınlanan ışığın dalga boyu (metre)



Şekil 2.1 : Atomların Uyarılması

Soğurma ve salma işlemleri Şekil 2.2. (a), (b) ve (c) de gösterilmişlerdir. Normal şartlar altında kendiliğinden salmanın oldukça büyük olması sebebiyle uyarılmış salmayı gözleyemeyiz. Bir kendiliğinden geçiş yapmadan önce elektronun uyarılmış seviyede geçirdiği ortalama zaman, uyarılmış halin τ_{21} ömrü olarak adlandırılır. '21' işleme giren enerji seviyelerini gösterir. Bir özel atomun verilen bir zaman aralığında kendiliğinden salma yapma ihtimali, A_{21} kendiliğinden geçiş oranını göstermek üzere, $A_{21}dt = dt/\tau_{21}$ ile verilir. Herhangi bir atomdan yapılan kendiliğinden salma rasgele yayma yapacağından, çok sayıda atomun yapacağı salmanın açıkça ahenkli olmayacağını söyleyebiliriz. Buna ters olarak uyarılmış salma işlemi, uyarma ve uyarılan fotonlarıyla uyumlu dalgalar eşdeğer frekanslarda olduklarından, uyarılmış salma işlemi ahenkli dalga üretecektir (aynı fazda ve kutuplanmanın benzer hallerine sahip olmaları ve aynı yönde ilerlemeleri sebebiyle). Bu, uyarılmış salmayla gelen bir dalga genliğini, açıkça bir yükseltmenin yapıldığı uyarılmış atomlar topluluğu boyunca geçerken, büyütebileceğimiz anlamına gelir. Uyarılmış salmayla eşdeğer çalışan soğurma geçişleri, sadece uygun enerjili foton varlığında gerçekleşeceğinden bu uyarılmış soğurma olarak ifade edilir. Bu işlem biri diğerinin tersi olarak düşünülebilir.



Şekil 2.2 : (a) Soğurma, (b) Kendiliğinden Salma, (c) Uyarılmış Salma

Lazerin çalışma prensibi, kuantum fiziği kuramlarına, enerji korunum kanunun uygulanmasına dayanır. Bir atoma dışarıdan enerji verildiğinde, atomun son yörüngesindeki elektron enerjisi alır ve daha yüksek enerjili bir yörüngeye geçer. Bu durum kararsız haldir. Elektron enerjisi foton olarak yayınlayarak daha düşük enerjili bir seviyeye geçiş yapar. Enerji değişimi, Planck sabiti ve frekansın bir fonksiyonudur. Formül 2.1.'den de görüleceği üzere durumlar arası geçişteki enerji farkı, yayınlanan ışığın dalga boyunu belirler.

Bir atomun uyarılabilmesi için yani bir üst enerji düzeyine geçebilmesi için atoma dışarıdan enerji verilmesi gereklidir. Verilmesi gereken bu enerji miktarının ne kadar gerektiğini ilgili atomun enerji seviyeleri belirler. Yani, atomun uyarılabilmesi için dışarıdan gelen fotonun enerjisi atomun iki enerji seviyesi arasındaki farka eşit olmalıdır.

Eğer, atom bir dış kaynaktan enerji soğursa (elektriksel, optik, termik veya kimyasal yoldan); bir valans elektronu uyarılmış seviyeye çıkar (Şekil 2.2.(a)). Bu uyarılmış atom kendi haline bırakılırsa, bir süre sonra almış olduğu enerjiyi her yöne dağılan ışık biçiminde dışarı salarak kendiliğinden geçişle daha düşük enerji seviyesine iner (Şekil 2.2.(b)). Fakat eğer yüksek enerjiye geçmiş bulunan uyarılmış atom dalga boyu kendisine uygun düşen bir foton tarafından tekrar uyarılırsa; enerjisini kendiliğinden yayınım biçiminde değil de zorunlu geçişle, uyarılmış ışınım

olarak ve çok daha kısa zamanda gelen fotonun frekansında ve yönünde iki foton birden ışıyarak daha düşük enerji seviyesine geçer. Bu durumda atomdan salınan fotonlar gelen foton ile aynı yönde ve aynı frekanstadır (Şekil 2.2.(c)). Böylece başlangıçtaki foton bir ışık demeti ise daha şiddetlendirilmiş olur.

Bu olayın bir lazer ışımasına neden olabilmesi için elektriksel ve optik olarak sistemin belirli bir yapıya (aktif ortam, enerji pompalanması ve optik rezonatör) olması gerekir. Ancak, bu yapıdan sonra ışıyım lazer özelliğini taşır [2].

2.2. Lazer Işığının Özellikleri

Lazer ışığının birçok özelliğini tartışırken bütün lazerlerin bu özellikleri aynı derecede sağlamayacağını not etmeliyiz. Bu, sıkça, verilen bir uygulama için lazer seçimine bir sınır koyar.

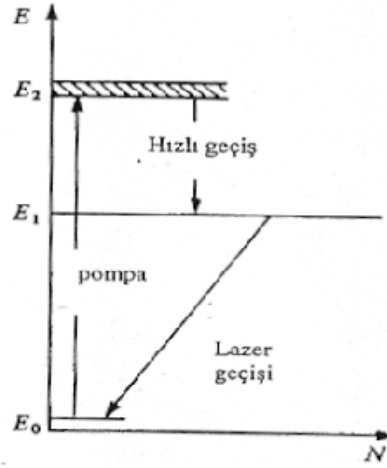
2.2.1. Paralel Işık Demet Özelliği (Yönlenebilirlik)

Lazer, paralel ışık demeti yayımlar. Yayılma doğrultusunda düşük bozulma gösterirler. Lazer ışığı kilometrelerce ışık huzmesi dağılmadan gidebilir. Oysa paralel olmayan bir ışık demeti yalnızca 5-10 cm aralığında bozulmaya başlar.

Lazerlerin belki de en ilgi çekici özelliği yönlenebilirliğidir. Yarıiletken eklem lazerleri dışında, lazerler radyasyonu oldukça yönlü ve düşük genişleme açısıyla ayarlı olarak salarlar. Bu, lazer demeti tarafından taşınan enerjinin kolaylıkla toplanıp, küçük bir alana odaklanabilmesi anlamına geldiğinden oldukça önemlidir.

2.2.2. Monokromatiklik (Çizgi Genişliği)

Lazer ışığı tek frekansa sahiptir. Bu frekans, Şekil 2.3.'de görüldüğü üzere lazerin oluştuğu enerji seviyeleri arasındaki geçişe bağlıdır. Her elementin atomunda bu elemente özgü olan elektron yerleşim düzeni vardır. Her elementin elektronu belirli enerjideki ışığı soğurabilir veya yayabilir. Bu nedenle her lazer tipi yalnızca belirli bir veya iki frekansta veya dalga boyunda ışık verebilir.



Şekil. 2.3 : Üç Seviyeli Sistemde Lazerin Enerji Geçişleri

Lazer ışığı potansiyel olarak oldukça tek renklidir; fakat lazer radyasyonunun spektral içeriği, lazer ortamının floresant çizgi genişliği kadar bir bölgeye uzanabilir. Bir başka deyişle, ferdi rezonatör modlarının çizgi genişliği oldukça küçük olmakla beraber lazer çıkışında bir çok mod bulunabilir. Lazer radyasyonunun yüksek spektral saflığı doğrudan, fotokimya, lüminesans uyarma spektroskopisi, soğurma ve Raman spektroskopisi ve iletişim gibi temel bilimsel araştırmalardaki uygulamalara götürür. Diğer birçok uygulama da kısmen lazerin bu özelliğine dayanır.

2.2.3. Koherentlik Özelliği (Eşfazlılık-Demet Ahengi)

Şekil 2.2.(c)'deki gibi birden fazla dalga, birbirine olan faz, genlik ve kutuplanma (polarite) ilişkisi değişmeden yol alır.

Uyarılmış salmanın karakteristiklerinden birisi, uyarılmış dalgaının uyarıcı dalgayla aynı fazda olmasıdır; yani iki dalgaının elektrik alanının uzaysal ve zamansal değişimi aynıdır. Böylece mükemmel bir lazerde elektrik alanının demet kesit yüzeyinin her noktası için özdeş olacak şekilde her noktada zamanla değişim gözlenecektir. Böyle bir demet mükemmel *uzaysal ahenge* sahip olacaktır. Diğer ilgili özellik *zamansal ahenktir*. Bu, zamanın fonksiyonu olarak aynı yerdeki elektrik alanının nispi faz bağıntısına karşılık gelir. Eğer faz zamanla sabit bir şekilde değişirse bu durumda demetin mükemmel zaman ahenkli olduğu söylenir. Bu fikirler Şekil 2.4.'de ifade edilmiştir.

Ahenk sıkça karşılıklı ahenk fonksiyonu $\gamma_{12}(\tau)$ cinsinden ifade edilir. Bu nicelik esasında kompleks bir sayıdır ve aynı anda ilerleme yönüne dik bir düzlem

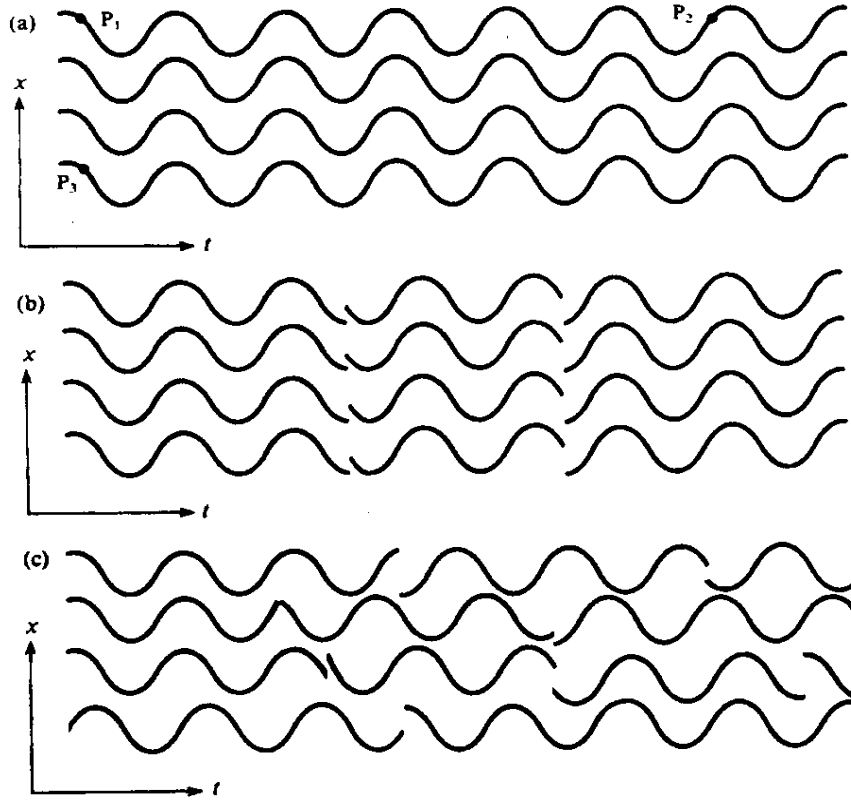
üzerindeki iki noktada (uzaysal ahenk) ve farklı t ve $t + \tau$ zamanlarında ilerleme yönü üzerindeki P_1 ve P_2 noktalarındaki (zamansal ahenk) ışık dalgaları arasındaki ilişkinin bir ölçüsüdür Şekil 2.4.(a)'da ki temsili noktaları görünüz. Sıfır ila bir arasında bir değere sahiptir. Eğer sıfır değerine sahipse ışık tamamen ahenksiz, bir değerine sahipse tamamen ahenklidir. Bu uç değerlere ulaşmak mümkün olmamakla beraber, bir tek enine modda çalışan gaz lazerinden elde edilen ışık hemen hemen bire yakın değere sahiptir.

Zaman ahengiyle ilgili iki faydalı büyüklük ahenk zamanı ve ahenk mesafesidir. Bunları anlamak için, bir demeti alıp, iki eşit parçaya bölüp, bu iki bileşenin farklı mesafeleri alıp Michelson girişim ölçerindeki gibi girişim saçaklarını oluşturmak üzere bir araya gelmelerine müsaade ettiğimizde ne olacağını inceleyelim. Girişim etkileri sadece, eğer iki demetin yol farkı bir araya getirildiklerinde ahenkli kalıyorsa gözlenir. Gerçek hayattaki kaynaklardan elde edilen ışık demetleri sonsuz uzunlukta dalga trenleri olarak temsil edilemezler; böylece yol farkına bir sınır koyulur. Lazerleri bir an için unutup kendiliğinden salma yapan bir atom grubunu ele alalım. Her bir atom diğerlerinden bağımsız olarak radyasyon yayar ve bunu sadece sonlu bir zaman için gerçekleştirir. Bu, sıkça salınma işleminin, komşu atomla çarpışma gibi sebeple bir yolla rahatsız edilmiş olması (perturbe) sebebiyledir. Böylece her bir atom bir sonlu boyda dalga treni üretir. Basit olması için bütün atomlardan gelen dalga trenlerini aynı boyda (L_c) aynı boyda kabul ediyoruz. Bununla birlikte atomlar rasgele yayma yaptıklarından dalga trenleri bir diğeriyle aynı fazda değildirler. Eğer böyle bir demeti Michelson girişim ölçerine gönderirsek, her bir ferdi dalga treni ikiye yarılacak ve ikiye yarılmış dalga treni yol farkı ' L_c ' yi aşmamak kaydıyla girişim yapabilecektir.

L_c 'yi ahenk mesafesi olarak isimlendiriyoruz. Eğer yol farkı L_c 'yi aşarsa bu durumda her bir dalga treninin iki yarım parçaları bir araya getirildiklerinde zamanca üst üste gelemeyecekler ve böylece girişim olayını gerçekleştiremeyeceklerdir. Buna ek olarak yol farkı sıfırla L_c arasında olduğunda, Şekil 2.5.'de görüldüğü gibi her bir dalga treninin sadece bir kısmı girişim olayında rol oynayacaktır.

Bu, yol farkını sıfırdan bire çıkardığımızda yapıcı ve yıkıcı girişimlere karşılık gelen şiddet dalgalanmalarının giderek zayıflayacağı ve L_c 'de hep beraber ortadan kalkacağı anlamına gelir.

Halbuki gerçekte dalga trenleri aynı boya sahip olmayıp bir ortalama değer civarında dağılmışlardır. Bununla birlikte şiddet dalgalanmalarının giderek zayıflayacağı sonucu geçerliliğini korur. Benzer şekilde ahenk mesafesinin kesin tanımı bir miktar daha karmaşıktır, fakat onu şiddet dalgalanmalarının öldüğü yol farkı olarak almak yine de mümkündür.



Şekil 2.4 : Ahengin Gösterilmesi

Şekil 2.4. (a)'da mükemmel ahenkli bir demet gösterilmektedir. Dalgaların bütün bileşenleri her zaman aynı fazdadırlar. (b)'de uzaysal ahenge sahip fakat nispi zamansal ahenk gösteren bir demet çizilmiştir. Bu, dalgaların fazlarını aynı anda her birkaç titreşimde özdeş miktarda değiştirmeleri sebebiyle oluşur. (c)'de her bir dalga fazının rasgele zamanlarda rasgele değiştiği hemen hemen hiç ahenkli olmayan demet gösterilmiştir. Bununla birlikte, çok kısa zaman aralıklarında fazların belli miktarda belirlenebilmeleri sebebiyle, bu durumda bile belli miktarda zamansal ahenk bulunabilmektedir.

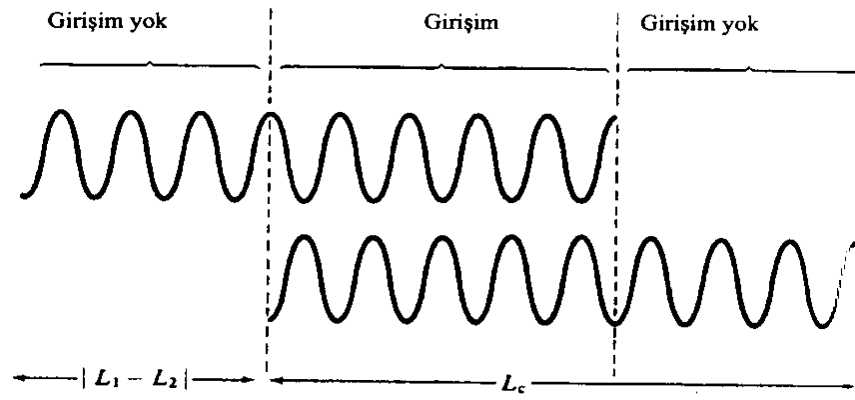
Ahenk zamanı (t_c) böylece kaynağın bir L_c boylu dalga treni salması için alınan zaman olarak tanımlanabilir. Bu durumda

$$t_c = L_c / c \quad (2.2)$$

yazabiliriz. Burada c ışık hızıdır. Gerçekte ahenk zamanının salma çizgi genişliğiyle

$$t_c = 1/\Delta\nu \quad (2.3)$$

ile bağlantılı olduğu gösterilebilir. Tartışmamızı kendiliğinden salmayı ele alarak başlattıysak ta ahenk yol ve zamanı aynı şekilde lazer radyasyonu için de geçerlidir.



Şekil 2.5 : Girişimin Gösterilmesi

L_1 ve L_2 gibi iki farklı mesafeyi almış L_c boylu iki özdeş dalga treni bir araya getirildiklerinde ancak $L_c - (L_1 - L_2)$ mesafesi boyunca girişime katkıda bulunurlar. Böylece ilerleme doğrultusundaki P_1 ve P_2 noktalarında ahenk olacağından P_1 ve P_2 ara mesafesi L_c 'den az olmalıdır.

Şimdi bir mükemmel yönlendirilmiş tek renkli ışığı ele alalım. Bu durumda faz, demete dik yüzey üzerindeki herhangi bir noktada aynıdır ve P_1 ve P_3 noktaları oldukça büyük uzaklıklara koyulabilir. Diğer taraftan tek renkli olmayan, tam anlamıyla yönlendirilmemiş demet için P_1 ve P_3 noktaları aralarında ahenk olması arzu ediliyorsa sadece birkaç milimetre aralıklı olabilirler. Bazen iki noktada fazların üzerinde birbirine bağlı kaldığı ana ilerleme yönüne dik mesafeyi temsil eden L_t ters ahenk mesafesini tanımlarız. P_1 ve P_3 noktaları arasında bir ahenk varsa bu durumda bu noktalardan gelen ışık birbirlerine yaklaştırılırsa girişim etkileri görülür. Prensip olarak bu Young'ın yarık sistemi kullanılarak gerçekleştirilebilir.

Örnek:

İlk olarak bütün ışığın bir düşük basınçlı sodyum lambasından yayıldığını düşünelim. $\lambda=589$ nm değerinde sodyumun D çizgilerinin tipik çizgi genişliği $5.1 \cdot 10^{11}$ Hz'dir. (2.3.) eşitliği bu durumda $t_c=2 \cdot 10^{-12}$ sn değerini verir ve (2.2 .) eşitliğinden $L_c=0.6$ mm bulunur. Bu değerleri bir He-Ne lazeriyle karşılaştırabiliriz. Çok mod işlemde bulunuyorsa 1500 MHz'lik bir çizgi genişliği, 0.2 m'lik bir ahenk mesafesini verir. Bununla birlikte 1 MHz'de bir tek modda lazer kararlı halde çalıştırılırsa bu durumda ahenk mesafesi 1500 kat daha büyük olacaktır yani 300 m.

Yukarıdaki örnek, bir çok modun varlığının bir lazerin zamansal ahengini nasıl büyük ölçüde düşürdüğünü gösterir. Aynı zamanda bu uzaysal ahenk için de doğrudur. Bir tek enine modda salma yapan mükemmel kararlı yapılmış bir lazer bütün demet kesit yüzeyi boyunca hemen hemen mükemmel ahenk sergiler. Gaz lazerinin TEM₀₀ modunu holografik işlemler için birkaç metrelik enine ahenk mesafelerine çıkarmak mümkün olmuştur. Diğer yandan belli sayıda enine mod bulunursa uzaysal ahenk epeyce azalmaktadır.

Sürekli (cw) gaz lazerlerinden ışık çıkışının ahengi çok yüksek olmakla birlikte bu, atma lazerlerinde genelde daha küçüktür. Bunun sebebi, zamansal ahengin lazer atması içindeki piklerin süresiyle veya salma sırasındaki kaymayla sınırlı olmasından dolayıdır. Böylece yakut lazerleri 0.6 μ s süreli pikler salar ve 0.1 μ s civarında ahenk zamanı gösterirler. Bazı çok kullanılan lazerlerin ahenk mesafeleri Tablo 2.1.'de verilmiştir.

Tablo 2.1 : Bazı Çok Kullanılan Lazerlerin Ahenk Mesafeleri

Lazer	Tipik Ahenk Mesafesi
He-Ne, tek enine, tek boyuna modlu	1000 m'ye kadar
He-Ne, çok modlu	0.1-0.2 m
Argon, çok modlu	0.02 m
Nd:YAG	10^{-2} m

Ahenk, lazer demetinin parçalara ayrılarak kullanıldığı uygulamalarda önemlidir. Bu uygulamalara farklı mesafeleri kat edecek şekilde ışığın parçalara ayrıldığı mesafenin girişimle ölçümü ve bozulma ile farklı uzaysal katkıya sahip olabilecek yaklaşık eşit olabilen farklı yolları alacak şekilde ışığın parçalara ayrıldığı holografi dahil edilebilir.

Düzgün olmayan yüzeylerden yansıyan lazer ışığının en çarpıcı karakteristiklerinden birisi onun tanelere ayrılmış görünüşüdür. Bu, komşu yüzey kesimlerden yansıyan ışığın katkılarından oluşmuş rasgele bir girişim deseninin sonucudur. Bazı bölgelerde bu katkılar yapıcı, bazı bölgelerde ise yıkıcı girişim yapabilirler. Bu davranış lazer ışığının yüksek ahenginin doğrudan bir sonucudur.

Birçok uygulamada, mesela holografide, benekli (speckled) desen sıkıntı yapmakla beraber bu durum metroloji ve titreşim analizi gibi alanlarda uygulama bulmaktadır [2].

2.3. Boltzman Dağılımı

Birim hacimde atom sayısı N olan atom grubunu incelediğimizde, Boltzmann eşitliğine göre,

$$N = e^{-E / kT} \quad (2.4)$$

Burada, N popülasyonu k Boltzmann sabitini ve T de mutlak sıcaklığı göstermektedir.

Herhangi bir absorpsiyon ve emisyon durumunda en az iki enerji seviyesinden bahsedilmelidir. Her iki enerji seviyesinin birbirine oranı Boltzmann ratio veya relative population olarak adlandırılır.

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{e^{-E_2 / kT}}{e^{-E_1 / kT}} \quad (2.5)$$

$$N_2 = N_1 e^{-(E_2 - E_1) / kT} \quad (2.6)$$

2.4. Nüfus Tersinmesi (Population Inversion)

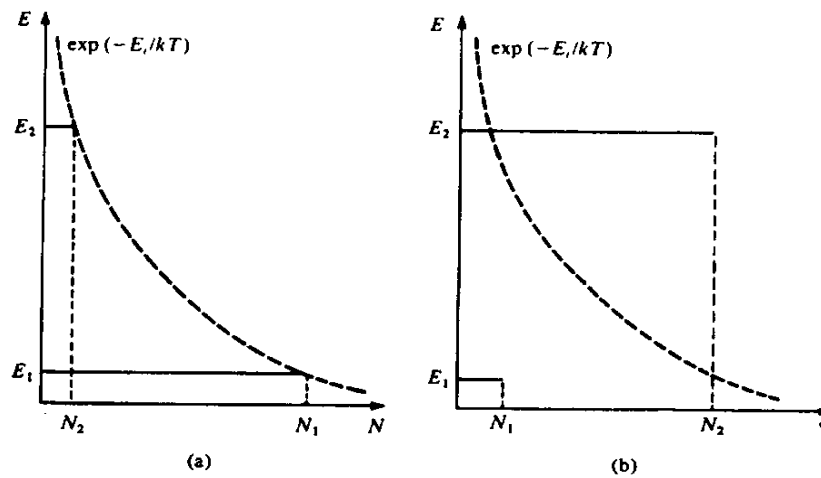
Işığın şiddetlendirilmesi için gerekli olan nüfus tersinmesi şartı atomik sistemin değişik enerji seviyeleri içinde atomun bir denge dışı dağılımını ifade eder. Isıl dengedeki bir sisteme uygulanan Boltzmann (2.6.) dağılımı, Şekil (2.6.(a))'da gösterilmiştir. N_2/N_1 oranı sabit bir sıcaklık için azalır. Görünür radyasyon verecek kadar bir enerji farkı için (2.0 eV), üst seviye nüfusunun aşağıdaki örnekte olduğu gibi, hemen hemen ihmal edilebilir.

Örnek:

Üst seviyeden alt seviyeye geçişte görünür bölge ışığı salacak durumdaki seviye nüfuslarını tahmin edebiliriz. 550 nm ortalama görünür ışık dalga boyunu alırsak $E_2 - E_1 = hc/550 \cdot 10^{-9}$ ve oda sıcaklığı varsayımı yapılırsa,

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{\frac{3.6 \cdot 10^{-19}}{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} \cong e^{-87} \cong 10^{-37} \text{ bulunur.}$$

Uyarılmış salma işleminin kendiliğinden salma ve soğurma işlemi ile yarıştığını söyleyebiliriz. Açıkça her uyarılmış salma yoluyla bir ışık demetini şiddetlendirmek istersek, bu işlemi diğer ikisine göre nispi olarak arttırmamız gerekir. Bir enerji seviyesi çifti için bu başarmanın N_2 üst seviyesi nüfus yoğunluğunun N_1 alt seviyesi nüfus yoğunluğuna göre arttırılması ve N_2 seviyesinin radyasyon yoğunluğunun da yükseltilmesi gerektiği sonucuna varırız. Aslında lazer olayını gerçekleştirmek için $E_2 > E_1$ olsa bile $N_2 > N_1$ şartını yani 'nüfus tersinmesini' gerçekleştirmek gereklidir.



Şekil 2.6 : İki Enerji Seviyeli Sistemin (a) Isıl Denge (b) Nüfus Tersinmesi Sonrası Nüfusları

Böylece açıkça bizim Şekil (2.6.(b))'den de görebileceğimiz gibi nüfus tersinmesi için, atomu E_2 enerjili seviyeye çıkarmak amacıyla büyükçe bir enerjiyi atomları uyarmada kullanacağımız sonucu çıkar. Bu uyarma işlemi '*pompalama*' olarak adlandırılır ve lazer teknolojisinin çoğu, verilen bir lazer sistemine bu pompalama enerjisinin nasıl sağlanacağı ile ilgilenir. Şimdi pompalamanın nasıl bir nüfus tersinmesini gerçekleştirdiğini görelim [2].

2.5. Çizgi Fonksiyonu

Küçük sinyal kazancı için denklem türetirken üst veya alt seviyedeki bütün atomların mükemmel tek renkli demetle etkileşebileceğini varsaydık. Gerçekte durum böyle değildir, spektral çizgiler sonlu dalga boyu (veya frekans) dağılımına sahiptirler; yani bir spektral kalınlıkları bulunmaktadır. Bu hem salma ve hem de soğurmada görülür ve eğer, mesela, E_1 ve E_2 gibi iki enerji durumu arasındaki geçiş için frekansın fonksiyonu olarak geçirmeyi (transmittance) ölçmek istersek Şekil (2.7.(a))'daki gibi bir zil-şekilli eğri elde ederdik.

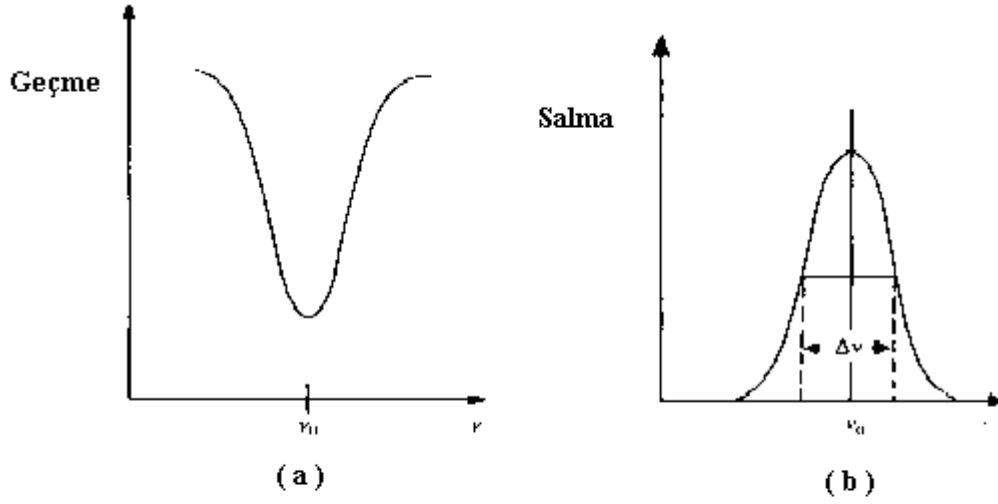
Salma eğrisi bunun tam tersi olurdu Şekil (2.7.(b)). Bu eğrilerin şekli, bir frekans ihtimal eğrisini tanımlamakta kullanılabilen çizgi fonksiyonu $g(\nu)$ ile verilir. Böylece $g(\nu)d\nu$ 'yu iki enerji seviyesi arasındaki geçişin frekansı ν ile $\nu + d\nu$ arasında olan bir fotonun salma (veya soğurmasıyla) sonuçlanan ihtimali olarak tanımlayabiliriz. $g(\nu)$ 'nın

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu)d\nu = 1 \quad (2.7)$$

ifadesini sağlayacak şekilde normalleştirildiğini söylüyoruz. Böylece $h\nu$ enerjili bir fotonun $h\nu$ enerjili bir başka fotonu uyarmak zorunda olmadığını görürüz. Bundan sonra $g(\nu)d\nu$ 'yu uyarılmış fotonun $h\nu$ ve $h(\nu+d\nu)$ arasında bir enerjiye sahip olma ihtimali olarak alacağız.

ν_s frekanslı bir tek renk demetin $g(\nu)$ çizgi fonksiyonlu bir grup atomla etkileştiğinde küçük sinyal kazanç sabitinin

$$k(\nu_s) = (N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1) \frac{B_{21} h \nu_s n g(\nu_s)}{c} \quad (2.8)$$

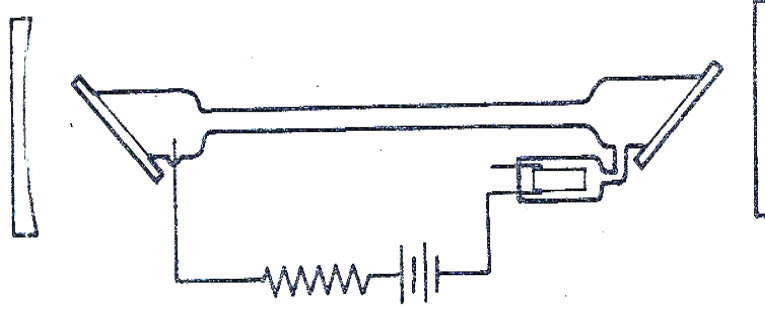


Şekil 2.7 : (a) E_1 ve E_2 Enerji Seviyeleri Arasındaki Geçişler İçin Geçirme ve (b) Soğurma Eğrisi

olduğu görülür. $g(\nu)$ çizgi fonksiyonunun şekli, verilen bir geçişteki spektral yayılma için mümkün özel bir mekanizmaya bağlıdır.

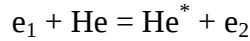
2.6. He-Ne Lazeri

He-Ne lazerinde aktif ortam 1/10 oranında He/Ne gaz karışımını kullanır. Neon, lazer geçişleri için enerji seviyelerini sağlar (Şekil 2.9.' da gösterilen çizgiler, sadece epeyce şiddetli olan 4 çizgidir, bununla beraber yaklaşık 150 farklı lazer geçişi gözlenmiştir.) Lazer geçişlerinde doğrudan rol almamakla beraber helyum atomları neon atomları için bir etkin uyarma mekanizması sağlamada önemli role sahiptir. Uyarma, Şekil 2.8' de gösterildiği gibi 10 torr civarında bir basınçta tutulan ince yançaplı bir cam tüp içinde bulunan gazı, 2-4 kV civarındaki yüksek bir gerilimin uygulanmasıyla oluşturulan bir dc boşalmayla gerçekleşir. Boşalma başladığında, boşalma tüpü negatif dinamik direnç gösterdiğinden, akımı sınırlandırmak ve güç kaynağını korumak için bir yüklem direnci eklemek gerekmektedir.



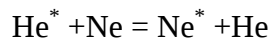
Şekil 2.8 : He-Ne Lazeri

Pompalama işlemini şu şekilde açıklanabilir: İlk adım, helyum atomlarının 2^1S ve 2^3S ile gösterilen iki yarı kararlı hallerine elektron çarpışma uyarılmasıdır. Bu

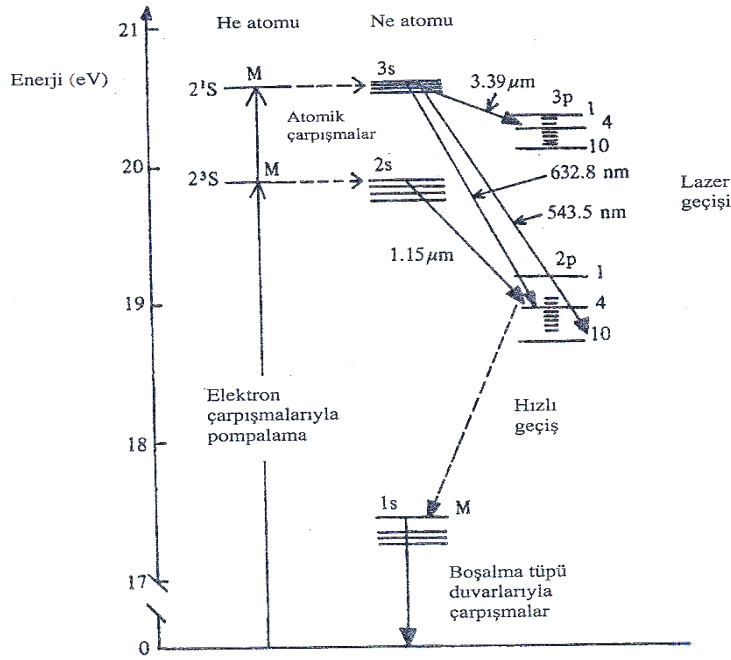


eşitliği ile gösterilebilir. Burda e_1 ve e_2 çarpışmadan önceki ve sonraki elektron enerjileridir. Uyarılmış seviyelerde bulunurken (He^*) helyum atomları enerjilerini çarpışabilmeleri yoluyla neon atomlarına aktarırlar. Bu enerjinin rezonant transferinin gerçekleşme ihtimali, $\exp(-\Delta E/kT)$ ile orantılıdır. Burada ΔE olaya giren iki atomun uyarılmış halleri arasındaki farkı göstermektedir.

He ve neon için enerji seviyesi diagramı Şekil 2.9.' da gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi her iki uyarılmış helyum durumları ve rezonant transferinin kolay gerçekleşmesi sebebiyle aynı enerji seviyesinde dörtlü bir neon grubu oluşur. Enerji transferi



Eşitliği ile temsil edilir. Böylece nüfus tersinmesi $3s$ ve $(3p, 2p)$ seviyeli gruplarla $2s$ ve $2p$ seviyeleri arasında gerçekleşir. $3s$ ve $2s$ seviyeleri ve $3p - 2$ seviyeleri arasındaki geçişler kuantum mekanik seçim kuralları sebebiyle yasaktır.



Şekil 2.9 : He-Ne Lazeri Enerji Seviyeleri

He-Ne lazeri dört seviyeli bir sistem örneğidir ve lazer geçiş seviyeleri nüfuslarının mümkün olduğunca düşük olmasını arzu edilir. Bu, lazer geçiş seviyesindeki elektronların mümkün olduğunca çabuk taban haline: geçmeleri gerektiği anlamına gelir. Neonda bu iki adımlı bir işlemdir; ilk adımda 2p – 1s arasında hızlı bir geçiş olur, fakat ikincide (1s’ den taban seviyesine geçiş) bu hızlı değildir. Bununla beraber ikinci geçiş oranı boşalma tüpünün duvarlarının içindeki çarpışmalar yoluyla artırılır. Esasında lazer kazancının tüp yarıçapıyla ters orantılı olduğu bulunmuştur. İşte bu sebeple boşalma tüpü yarıçapı oldukça küçük tutulmak durumundadır.

2p → 1s geçişi, neon ışıklarının bilinen renginde artış sağlaması sebebiyle ilgi çekicidir. Böylece 2p seviyesi boşalma ile nüfuslandırılmalıdır. Bu şanssız bir durumdur, çünkü 2p seviyesi nüfusundaki artış, nüfus tersinmesinde bir azalma anlamına gelmektedir (bu enazından 1.15.μm, 632.8 nm ve 543.5 nm için geçerlidir) ve aslında bu etki yüksek tüp akımlarında, lazerin çalışmasını kesmekten belli bir noktaya kadar sorumludur. Böylece biz, sadece akımı sonsuza kadar artırarak çıkışı artırma serbestiyetine sahip değiliz. Bu sebeple He-Ne lazeri düşük güçte çalışmaktadır.

Dört ana lazer geçişlerinin (3.39; 1.15 ; 0.6328; 0.5435 μm) her biri diğeriyle ya başlangıç veya bitiş seviyelerinin ortak olması özelliklerini paylaşır. Böylece geçişler devamlı birbirleriyle yarışır ve bu sebeple istenmeyen lazer titreşimlerini görmemek için bazı tedbirler alınır. Bu çok katmanlı dielektrik kaplamanın kullanıldığı aynaların olaya katılması ile (herbir kaplama kendine has yansıtma: sahip olacağından) kolayca gerçekleştirilebilir. Böyle aynaların çok düşük soğurma kaybı He-Ne ortamının kazancının düşük olması sebebiyle oldukça önemlidir

He-Ne lazerinin temel yapısı oldukça basittir. Temel elemanlar Şekil 2.8.' de gösterilmektedir. Boşalma genelde yüksek bir gerilim '*ateşleme*' başlatılır ve bundan sonra 10 ile 20 mA'lık bir akımla sürdürülür. Rezonant boşluğu oluşturan aynalar bazen boşalma tüpünün uçlarına konulurlar (yapıştırılırlar); böylece gazı hapseden bir mühür halini alırlar. Alternatif olarak aynalar, tüp eksenine Brewster açısında yönlenmiş cam pencerelerle yapışmış olacak şekilde tüpe dışardan konulabilir. Bu şekildeki bir düzen , gelme düzlemine paralel titreşen elektirik vektörlü radyasyonun tamamen geçmesine sebep olur ve her bir tur için (Minum güç). maximum kazanç sağlar. Brewster pencereleri aynı zamanda çıkışın kutuplanmış olmasında sağlar. He-Ne lazerinde güç çıkışı oldukça küçüktür (5 mW – 100 mW). Radyasyonun yönlenmiş, ahenkli ve dar bir çizgi genişliğine sahip olması bir çok uygulama için oldukça kullanışlıdır [2].

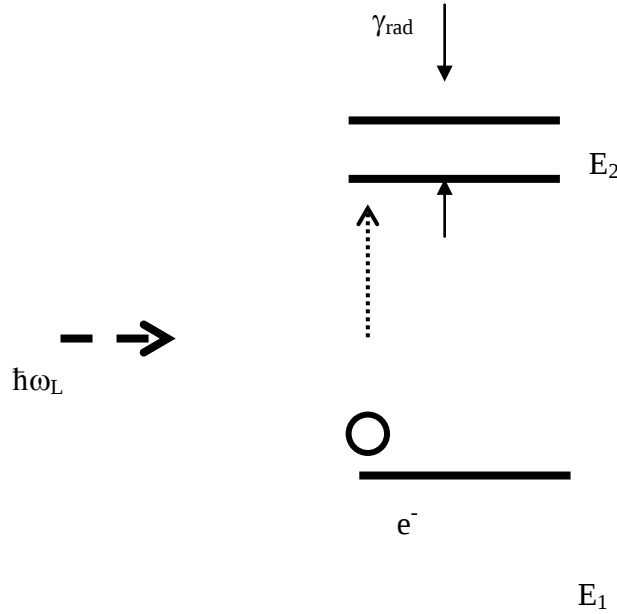
3. LAZER SPEKTROSKOPİSİ

Lazer spektroskopisi denilince daha çok lazer ışığının gaz halindeki atomlarla veya atomik moleküllerle olan etkileşimleri akla gelmektedir. Bu etkileşimler sonucunda atomlara ait birçok fiziksel özellikler gözlenebildiği gibi bunun tersini de söylemek mümkündür. Yani fiziksel özelliklerini bildiğimiz atomları kullanarak nadiren de olsa lazer ışığına ait bazı özelliklerin de bulunması doğal karşılanabilir. Bu kısımda daha çok He-Ne lazer ışığıyla gaz halindeki atomların etkileşiminden elde edilecek veriler inceleneceğinden lazer ışığı, Doppler genişlemesi, Hole burning, Bennet çukuru, Lamp çökmesi, Doppler rezonansların genişlemesine sebep olan temel

etkenler, frekans kararlılığı ve optik frekans standartları hakkında kısa bir bilgi sunumu faydalı olacaktır.

3.1.1. Doppler Genişlemesi

Doppler etkisi belli bir referans noktaya göre hareket halindeki cismin, kendisine göre göreceli olan bir nesnenin hızını veya frekansını kendi sahip olduğu hızdan dolayı farklı algılama olayıdır. Gaz halindeki atomlar bulundukları ortamda hareket halindedirler (örneğin sezyum atomlarının oda sıcaklığındaki ortalama hızları 300 m/s dir). Eğer atomu hareketsiz ve ideal iki seviyeli enerji geçişlerine sahip olarak düşünürsek; gelen fotonun enerjisi, $E=\hbar\omega_0$ ve atomun enerji seviyeleri E_1 temel enerji seviyesi, E_2 uyarılmış enerji seviyesi ise (Şekil 3.1.),



Şekil 3.1 : Elektromanyetik Dalganın Atom Tarafından Soğurumu

$\hbar\omega_L=E_2-E_1$ olduğunda atom gelen fotonu soğurur. Fakat atomun belli bir hızı varsa bu hızından dolayı gelen lazer ışığının frekansını hızının yönüne bağlı olarak farklı algılayacaktır. Bu durumda soğrulan lazer ışığının ω_L frekansı, atomun enerji geçişleri arasına denk gelen mutlak frekans farkı ω_0 'dan (kv) kadar farklılık gösterecektir. Bunu $\omega_L = \omega_0 + k.v$ veya $\omega_L = \omega_0 + kv\cos\theta$ şeklinde ifade edebiliriz [3]. Burada,

ω_L : lazer frekansı

ω_0 : atomun hızının sıfır olduğu andaki iki enerji seviyesi arasına denk gelen elektromanyetik dalganın frekansı

k : dalga vektörü, $k=2\pi/\lambda$

v : atomun hızıdır.

Isısal dengedeki atomlar Maxwell hız dağılımına sahiptirler. Eğer,

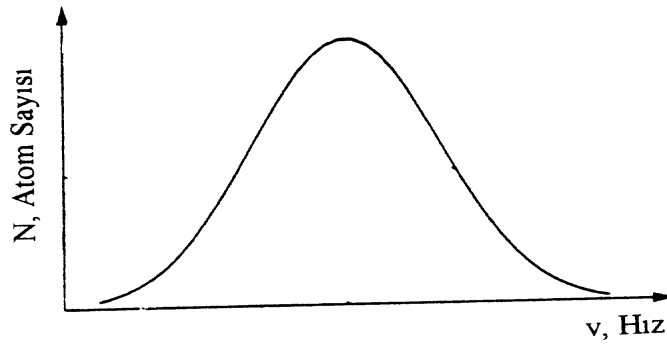
T : sıcaklık

n_i : v_z ile (v_z+dv_z) hız aralığındaki birim hacim içindeki E_i enerji seviyesindeki atom sayısıysa,

+z yönünde ilerleyen gaz halindeki bir atom demetinin içindeki atom sayısının hızlarına göre değişimi aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$n_i(v_z) dv_z = [N_i/v_p \pi^{1/2}] \exp[-(v_z/v_p)^2] dv_z$$

Maxwell hız dağılımı olarak ifade edilen bu formülde $N_i = n_i(v_z) dv_z$ yani i enerji seviyesi E_i de bulunan tüm atomların yoğunluğu, $v_p = (2kT/m)^{1/2}$ hız, m , atom kütlesi ve k , Boltzman sabitidir. Bu ifadenin grafiksel ifadesi ise Şekil 3.2.'deki gibidir:



Şekil. 3.2 : Maxwell Dağılımınca Atom Sayısının Hızlarına Göre Değişimi

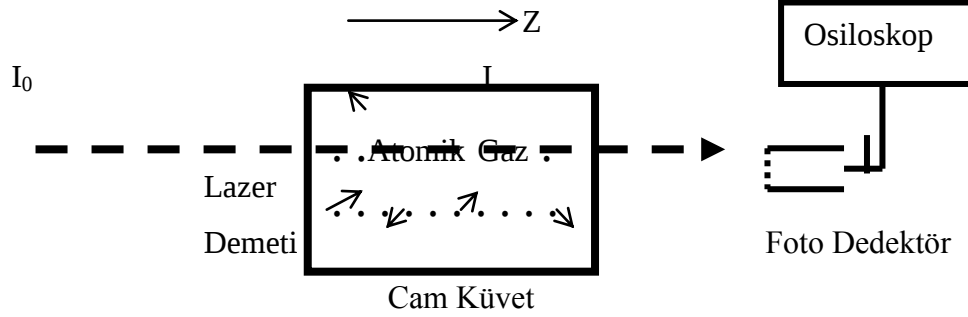
Bu ifadeyi frekans cinsinden yazmak istediğimizde,

$$v_z = c/\omega_0 \rightarrow dv_z = (c/\omega_0)d\omega \text{ olduğuna göre}$$

$$n_i(\omega)d\omega = [N_i c / \omega_0 v_p (\pi)^{1/2}] \exp\{-[c(\omega-\omega_0) / \omega_0 v_p]^2\} d\omega$$

şeklini alır.

Kapalı saydam bir küvet (cam hücre) içinde atomik gaz düşünelim. Işık şiddeti (parlaklığı) I_0 olan lazer demeti küvetin çıkışında I değerine düşsün (Şekil 3.3.).



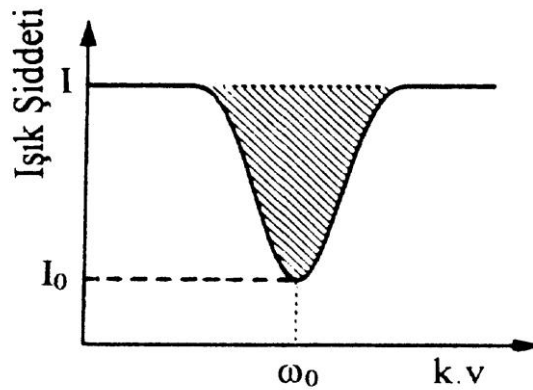
Şekil 3.3 : Cam Küvet İçindeki Atomik Gazla Etkileşime Giren Lazer Işın Demeti

Işık şiddetindeki azalma cam küvet içindeki atomların lazer ışığını α , soğurma katsayısı, l , küvet uzunluğu olmak kaydıyla $I = I_0 e^{-\alpha l}$ ilişkisine göre soğurmalarından kaynaklanmaktadır.

Eğer küvet çıkışındaki sinyal bir fotoalıcıyla algılanırsa osiloskop ekranında göreceğimiz soğurma grafiği Şekil 3.4'deki gibi olacaktır:

Yani atomlar hızlarının yönü ve büyüklükleri mertebesinde $\omega_L = \omega_0 + k \cdot v$ eşitliği gereğince lazer ışığını soğuracaklardır. Bu soğurma grafiğini ters çevirerek (invert) incelediğimizde veya soğurma katsayısının frekansa göre değişimine baktığımızda,

$I(\omega) = I_0 \exp\{-[c(\omega - \omega_0)] / \omega_0 v_p\}^2$ şeklinde ifade edebiliriz. Bu bir Maxvell (Şekil 3.4.) dağılımıdır. Işık şiddetinin $I_0/2$ olduğu genlikteki dalga genişliği

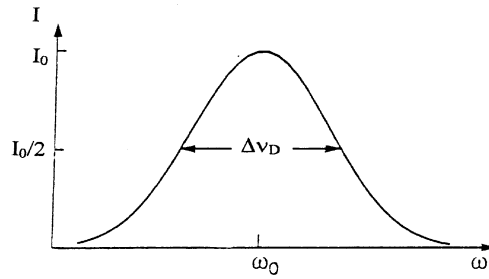


Şekil 3.4 : Lazer Işık Şiddetinin Atomların Hızlarına Göre Değişimi

(full halfwidth at half maximum, FWHM), $\Delta\omega_D$, Doppler genişliği olarak adlandırılır ve değeri, $\Delta\omega_D = [2(\ln 2)^{1/2} \omega_0 v_p] / c = (\omega_0 / c)(8kT \ln 2 / m)^{1/2}$ dir.

Güncel bir örnek vermek gerekirse Cs atomlarının uyarılmış seviyedeki doğal yaşam süresi $\tau \approx 30$ ns dir. Buradan doğal çizgi genişlikleri $\delta\gamma_{\text{rad}} = 1/2\pi\tau = 5 \times 10^6$ Hz olup, $\Delta\omega_D \approx 5 \times 10^8$ Hz'dir. Cs atomlarıyla etkileşime giren lazer ışık frekansının $\omega_L = 3.5 \times 10^{14}$ Hz olduğu düşünülürse, $\Delta\omega_D/\omega_L \approx 10^{-6}$ 'lar mertebesinde bir kalite faktörü vermiş olup $E_2 - E_1 = \hbar(\omega_0 \pm \Delta\omega_D)$ şeklinde düşünülebilir (Şekil 3.5.).

Şekil 3.5 : Atomun hızından dolayı oluşan Doppler genişlemesi.



Lazer ışığının atomlarla etkileşimi sonucu elde edilen soğurum spektroskopisinden aşağıdaki ölçümler veya büyüklükler hakkında bilgi elde edinebiliriz;

- 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 ısıtım yapan atomların hız dağılımları ve atomların sıcaklıklarının bulunması,
- 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.

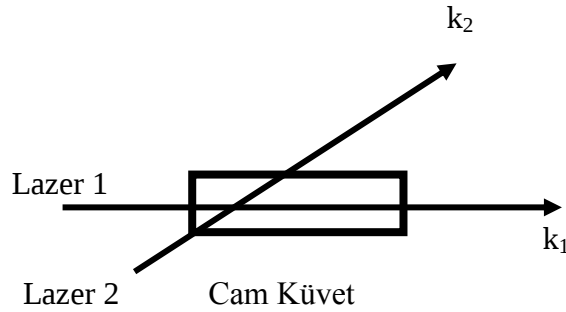
- Soğurum spektroskopisinin alt-doppler (sub-doppler) şekilleri elde edilerek lazer frekansının bu spektral çizgilerde kilitlenmesinde kullanılırlar.

3.1.2. Hole Burning ve Bennet Boşluğu

Bilimsel çalışmalarda yüksek doğrulukta ve kararlılıkta elektromanyetik dalgalara ihtiyaç vardır. Daha önce de söz edildiği gibi lazer ışığı da bir elektromanyetik dalgadır. Lazer frekansındaki doğruluk ve kararlılığın iyileştirilmesi amacıyla elektronik (elektro optik modulatör, akusto optik modulatör v.b.) ve optiksel (frekans modülasyon, Zeeman modülasyon) kilitleme teknikleri kullanılmaktadır. Maliyet, kullanım kolaylığı ve hassasiyet bakımından optiksel kilitleme yöntemleri elektriksel yöntemlere göre birçok avantajlara sahiptir.

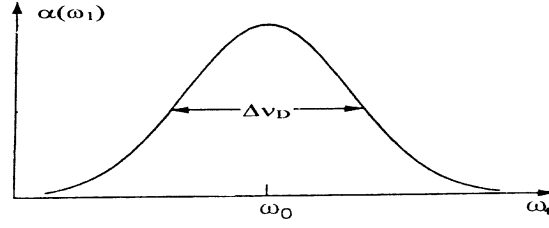
Bu amaçla Doppler soğurum spektrumundaki band genişliğinin azaltılması gerekmektedir. Elde edilen alt Doppler soğurum spektroskopisi bant genişliğinin azalmasına ve dolayısıyla daha keskin (ince) rezonanslarda çalışabilme kolaylığı sağlamaktadır.

Hole burning veya Bennet çukuru dediğimiz Doppler dağılımı üzerindeki bu çökmenin görülebilmesi için iki farklı lazer ışığına (Şekil 3.6.) ihtiyaç vardır.



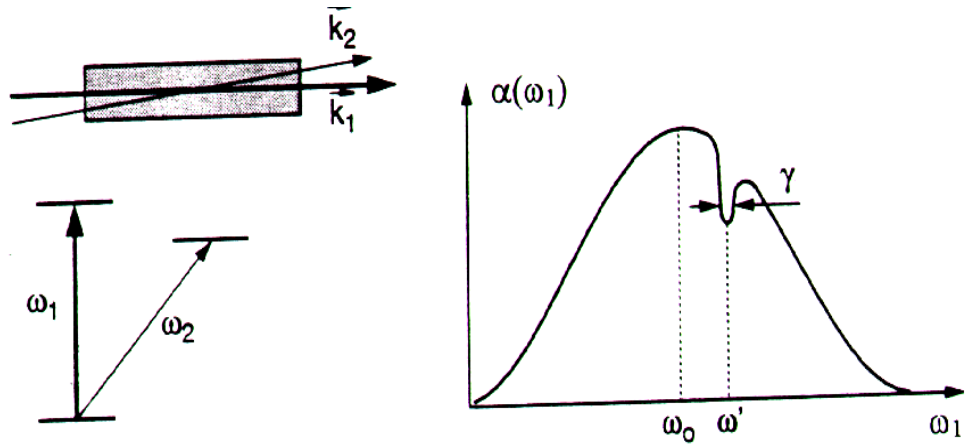
Şekil 3.6 : Atomlarla Etkileşime Giren İki Farklı Lazer Demeti

Şekil 3.6.'dan görülebileceği gibi prop lazer olarak adlandırdığımız lazer 1'in küvet içinde soğurumunun lazer frekansına göre değişimi aşağıdaki (Şekil 3.7.) gibi



Şekil 3.7 : Lazer 1 Işığının Atomlar Tarafından Soğrulmasında Oluşan Grafik

olacaktır. Pump lazer (lazer2) daha güçlü ışık şiddetine sahiptir ve lazer 2 ışığı $\omega_2 - \omega_0 = k_2 \cdot v'$ formülü gereğince belli v' hızına sahip küvet içindeki atomlar tarafından ayrıca soğrulacak ve dolayısıyla lazer1'in soğrulma spektrumunda bir çökme oluşacaktır. Daha açık bir ifadeyle lazer1 ışığı küvet içinde atomların hızlarına bağlı olarak atomlar tarafından Şekil. 3.7.' ye göre soğrulur. Yani temel enerji seviyesindeki (E_1) atomlar lazer1 ışığını soğurarak uyarılmış seviyeye geçmekte ve sonra uyarılmamış (spontaneous) ışımaya yaparak tekrar temel enerji seviyesine düşmektedirler. Fakat pump lazer (lazer2) ışığıysa lazerin ω_2 frekansına bağlı olarak v' hızındaki atomlar tarafından aynı anda soğrulacak ve dolayısıyla lazer1'i soğuracak temel enerji seviyesindeki atom sayısında bir azalma olacaktır. Çünkü v' hızına sahip soğurucu atomlar uyarılmış enerji seviyesinde bulunacaklardır. Bu durumda lazer1'in soğurum spektrumunda "Bennet çökmesi" olarak adlandırılan azalma yani çökme oluşacaktır (Şekil 3.8.) [3].



Şekil 3.8 : Doppler Soğurum Spektroskopisinde Oluşan "Bennet Çökmesi"

$$\alpha(\omega_1) = \alpha_0(\omega_1) - \alpha_2(\omega_1, \omega_2)$$

Bennet çökmesini şekil üzerinde görmek istediğimizde aşağıdakiğ profil elde edilmiş olur ve elde edilen şekil bir Lorentz dağılımı oluşturur;

$$\alpha(\omega_1) \approx (\gamma/2)^2 / [(\gamma/2)^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2]$$

Son durumda lazer1'in v' hızındaki atomlar tarafından, ki bu lazer 2'nin soğurumu sebebiyleydi, soğrulamaması aynı zamanda doyum (saturation) rezonansı olarak da adlandırılır. γ genişliğini doyum parametreleri cinsinden yazmaya kalktığımızda ise

$$\gamma = \gamma_{\text{rad}} (1+S_0)^{1/2}$$

S_0 doyum rezonansı olup değeri

$$S_0 = 2P / (R_1+R_2),$$

ideal iki enerji seviyeli atomlarda,

P:soğurum olasılığı,

R_1 ve R_2 ise E_1 ve E_2 enerji seviyelerindeki atomların gevşeme (relaxiation) olasılıklarını göstermektedir.Daha açık bir ifadeyle S_0 aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$S_0 = 2\sigma_{12}I(\omega) / \hbar\omega A_{12}$$

σ_{12} : atomun $|1\rangle$ seviyesinden $|2\rangle$ seviyesine geçişindeki cross-section,

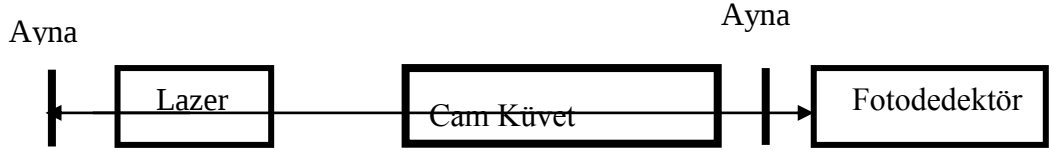
I: lazer demeti şiddeti,

ω : lazer frekansı,

A_{12} : Einstein soğurum katsayısı.

3.1.3. Lamb Çukuru (Lamb çökmesi)

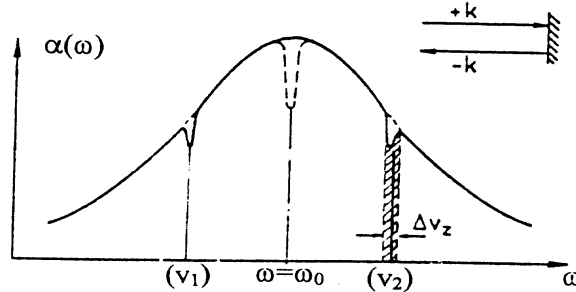
Doppler soğurum grafiğinde elde edilen alt-Doppler doyum rezonansı, tek bir lazer kullanımıyla da gerçekleştirilebilir (Şekil 3.9.).



Şekil 3.9 : Alt-Doppler Doyum Rezonansları

Yukarıdaki düzenden de görülebileceği gibi tek bir lazer ışığı atom küveti içinde düzlem aynalar kullanılarak kendisi üzerinden geriye yansıtılmıştır. Bu durumda oluşan Doppler soğurum spektroskopisi Şekil 3.10.'daki gibi olur.

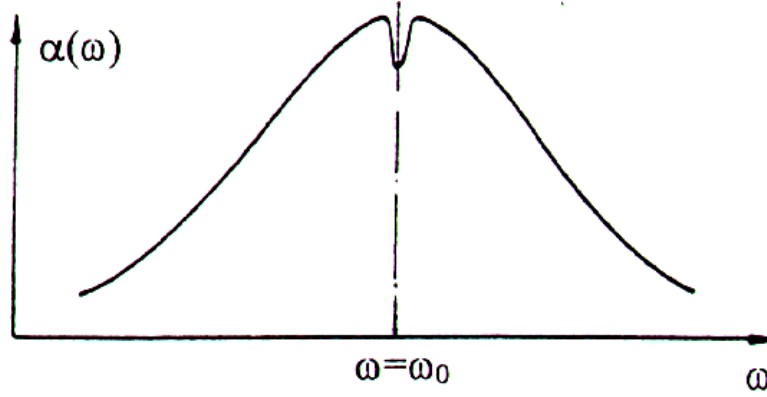
Doppler soğurum spektroskopisi üzerinde iki adet Bennet çökmesi oluşmaktadır. $k=2\pi/\lambda$, ω_0 : rezonans frekansı, ω : lazer frekansı ise $+z$ yönünde ilerleyen lazer ışığı (pump veya saturated lazer demeti) belli bir t zamanı anında v_2 hızındaki atomlar tarafından soğrulmakta aynı anda $-z$ yönünde ilerleyen lazer ışığı (probe lazer demeti) ise v_1 hızındaki atomlar tarafından soğrularak Maxwell hız dağılımı üzerinde iki adet Bennet çökmesi oluştururlar. Yani t anında $+z$ yönündeki lazer ışığını soğuran v_2 hızındaki atomlar uyarılmış seviyede bulunduklarından aynı anda $-z$ yönündeki lazer ışığını soğuramazlar. Bu durumda $-z$ yönündeki lazer ışığı için v_2 hızındaki atomlar doyuma ulaşmıştır yani uyarılmış enerji seviyesindedirler. Aynı durum $-z$ yönünde ilerleyen lazer ışığı için de geçerlidir. Lazerin ω frekansı ayarlanarak $\omega - \omega_0 = kv$ eşitliğinden $\omega - \omega_0 = 0$ ($k.v=kv\cos\theta=0$ eğer $\theta=0$ ise) veya $\omega = \omega_0$ durumunda iki adet Bennet çökmesi ω_0 frekansında (rezonans frekans) soğurum profili üzerinde bir çökme oluşturur.



Şekil 3.10 : Bir Lazer Demetiyle Elde Edilen Bennet Çökmeleri

Rezonans frekanstaki bu çökmeye Lamb çukuru (Lamb dip) denir (Şekil-3.11.). Bir başka ifadeyle $\omega = \omega_0$ durumunda $+z$ ve $-z$ yönünde ilerleyen lazer demetleri

artık aynı hıza sahip ve yönleri z eksenine dik olarak ilerleyen atomlar tarafından soğrulmaktadır. v_1 ve v_2 hızlarında oluşan Bennet çukurlarının genlikleri A ise merkez frekanstaki Lamb çukurunun genliği iki çukur genliklerinin toplamı $2A$ kadar olacaktır.



Şekil 3.11 : Rezonans Frekansta Oluşan Lamb Çukuru

Bir başka ifadeyle $\omega = \omega_0$ durumunda $+z$ ve $-z$ yönünde ilerleyen lazer demetleri artık aynı hıza sahip ve yönleri z eksenine dik olarak ilerleyen atomlar tarafından soğrulmaktadır. v_1 ve v_2 hızlarında oluşan Bennet çukurlarının genlikleri A ise merkez frekanstaki Lamb çukurunun genliği iki çukur genliklerinin toplamı $2A$ kadar olacaktır. Bu durumda iki enerji seviyesi arasındaki farkta merkez doyum rezonansından dolayı oluşacak belirsizlik $E_2 - E_1 = h(\omega_0 \pm \gamma)$ olacak ve γ (merkez doyum rezonans genişliği)

$$\gamma = \gamma_{\text{rad}}(1 + S)^{1/2}$$

şeklinde olup S saturasyon (doyum) parametresiyle ifade edilecektir [3].

3.2. Bağımsız Doppler Rezonansların Genişlemesine Sebep Olan Temel Etkenler

3.2.1. Atomik Gaz Basıncı veya Atomlar Arası Çarpışmalar

i enerji seviyesinde (E_i) bir A atomu, k enerji seviyesinde (E_k) bir B atomuna veya bir B molekülüne atomik boyutlarda yaklaştığında; A atomunun enerji seviyesinde her iki atom arasındaki etkileşmeden dolayı bir kayma oluşur. Bu kayma A ile B atomlarının kütle merkezleri mesafesine $R(A,B)$ ve A atomunun elektron dağılımına bağlıdır. Bu tür çarpışmalardan sonra atomların enerji seviyesindeki kayma pozitif

(artı) veya negatif (eksi) olabilir. Eğer A ve B atomları arasındaki etkileşim atomların birbirlerini itmesi şeklindeyse ΔE enerji kayması artı, çekmesi şeklindeyse ΔE enerji kayması eksidir. Atom çiftleri arasındaki karşılıklı etkileşimde atomlar atomlar arası R mesafesi belli bir R_c mesafesinden $R \leq R_c$ şeklinde ise buna çarpışma denmekte ve $2R_c$ mesafesine ise çarpışma çapı denmektedir. Işımasız geçişlerle atomlar arasındaki çarpışmalarda, atomların iç enerjilerinde herhangi bir değişiklik söz konusu değilse bu tür çarpışmalara elastik çarpışma eğer iç enerji değişimi varsa buna da inelastik çarpışma denmektedir. Çarpışma esnasında recombination v.b. gibi çiftlerin kararlı duruma gelmesiyle ilgili herhangi bir olay yoksa elastik çarpışmalarda çarpışan çiftler belli bir çarpışma zamanı, τ_c , ($\tau_c = R_c/v$) sonrası tekrar ayrılacaklardır. Burada v atomun göreceli hızıdır. Esnek ve esnek olmayan çarpışmalar sonucu, Lorentzian çizgi profili şeklindeki soğurum rezonanslarında merkez frekansta hem genişleme (broadening) hem de kayma (shift) olayları mevcuttur [3].

3.2.2. Transit Zaman Genişlemesi

Lazer spektroskopisinde yapılan birçok çalışmada atomların lazer demetiyle yapmış oldukları etkileşim (interaction) süresi bu atomların uyarılmış seviyelerdeki yaşam sürelerine göre daha kısa olabilir. Bir cam hücre içinde gaz halinde bulunan bir atom termal sıcaklığından dolayı hareket halindedir. Bu cam hücreye d çapında bir lazer ışık demetinin gönderildiğini ve hareket halindeki atomun bu lazer demeti içinden demete göre enlemesine (demetin ilerleyiş yönüne dik) geçtiğini kabul edelim ve bu geçiş esnasında lazer demeti içindeki fotonların atom üzerinde bir basınç etkisinin olmadığını varsayalım. Fiziksel olarak atom ile lazer ışık demeti arasında bir etkileşimin olduğunu da kabul edelim. v termal hızdaki atom d çaplı lazer demeti içinden T ($T = d / v$) zamanında geçer. Bu etkileşim süresi atomun uyarılmış seviyedeki spontane yaşam süresinden daha kısa ise etkileşim rezonanslarında bir genişleme görülür. Bu tür genişlemenin engellenebilmesi ya lazer demet çapının artırılması ya da etkileşime girecek atomların termal hızının azaltılmasıyla mümkün olmaktadır [3].

Genel olarak etkileşime giren atomlardan elde edilen soğurum rezonanslarındaki çizgi genişliği (Δv_{FWHM}) atomun elektronik geçiş seviyelerindeki doğal çizgi genişliği $\Delta v_{doğal}$, atomların birbirleriyle çarpışmalarından dolayı meydana gelen çizgi

genişlemesi $\Delta v_{\text{çarpışma}}$, atomların etkileşime girdikleri lazer demeti içinden çok hızlı (transit-time) geçmeleri ki bu genişlemeler atomun doğal yaşam süresi, demeti geçiş süresinden daha uzunsu baskın hale gelir, sebebiyle oluşan genişleme Δv_{t-t} etkilerinin toplamından oluşmaktadır;

$$\Delta v_{FWHM} = \Delta v_{\text{dogal}} + \Delta v_{\text{carpisma}} + \Delta v_{t-t} \quad (3.1)$$

Burada;

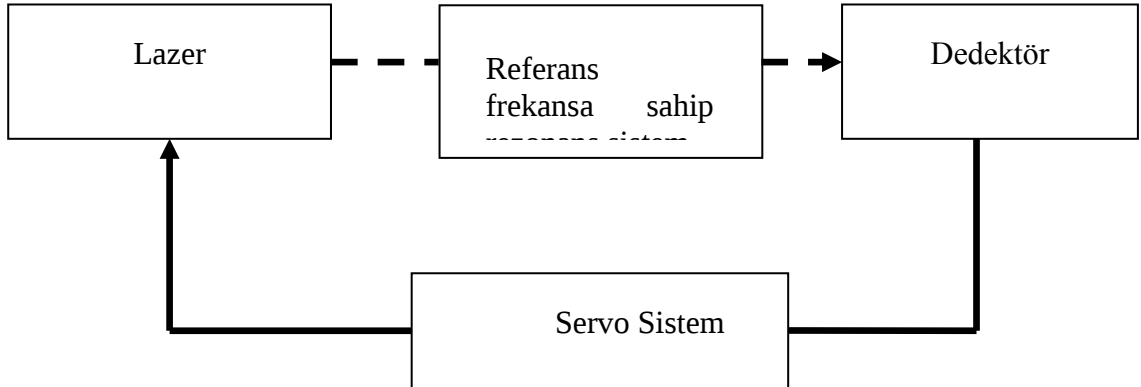
$\Delta v_{\text{dogal}} \propto 1/\tau$, τ : doğal yaşam süresi

$\Delta v_{\text{çarpışma}} = 2Nv\sigma$, N: atom sayısı, v: ortalama hız, σ : tesir-alanı (cross-section)

$\Delta v_{t-t} \propto v/d$, v: ortalama hız, d: lazer demeti çapı (atomun etkileşim süresince geçtiği mesafe)

3.3. Frekans Kararlılığının Temel Prensipleri

Lazerin osilasyon (salınım) frekansını kararlı hale getirmek için, lazerin merkez frekansı ile referans frekansı karşılaştırmak gerekmektedir. Kararlı şemalarda her iki frekans arasında karşılaştırma vardır. Aşağıdaki şekil lazerlerin frekans kararlılığının temel kavramlarını göstermektedir (Şekil 3.12.).



Şekil 3.12 : Lazerlerin Frekans Kilitlenmesinin Temel Konfigurasyonu

Lazer çıkışının bir kısmı referans bir frekansla karşılaştırılır, lazer ile referans frekans arasındaki hata sinyali elektriksel bir sinyale dönüştürülür.ve lazere geri beslenir [4].

Lazer frekansının kararlılığından bahsetmeden önce atomik frekans standartlarından (AFS) bahsetmekte fayda vardır. AFS'ler dış etkilere çok az etkilenen atomik

geçişlere kilitlenmiş yüksek kalitede osilatörlerdir. Mikrodalga zaman ve frekans standartlarında kuvars osilatörün frekansı sentezleyici kullanılarak atom veya moleküllerin mikrodalga enerji geçişlerine ayarlanır ve kilitlenir (Şekil 3.12). Bu kitleme osilatörün frekans doğruluk ve kararlılığının $10^3 - 10^4$ kat iyileşmesini sağlar. Osilatör frekansı bölücü vasıtasıyla 1 Hz'e düşürülerek saniyede 1 puls (1 PPS) üretilir ve sinyaller atomik saatlerin oluşturulmasında kullanılır.

Optik frekans standartlarında(OFS) ise lazer osilatör olarak kullanılır ve frekansı atom veya molekülün uygun enerji geçişine kilitlenir. Atomik frekans standartları, dedeksiyon sisteminde sinyalin gürültüye oranı (S/N) iyi olan ve sinyalin frekansının onun spektrumunun band genişliğine olan oranı çok yüksek ($Q = \nu/\Delta\nu$) olan sistemlerdir. Bu gereklilik; atomik veya moleküler geçişlerin atomik frekans sistemi için referans olabilmesini büyük ölçüde sınırlandırmıştır.

3.4. Optik Frekans standartları (OFS)

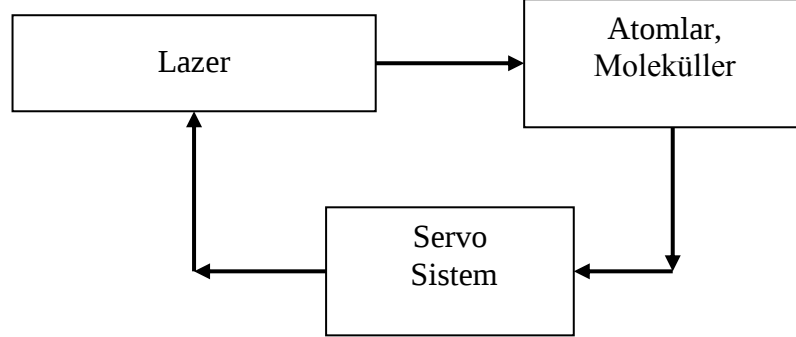
AFS' lerin temeline bakılınca, AFS; mevcut osilatörün, frekansına denk gelen atomların enerji geçişinde kilitlenmesi ve bunun sonucu olarak daha kararlı elektromagnetik dalga üretilmesidir. Daha iyi AFS yapımı ise hem osilatörün, hem de atomik sistemin parametrelerinin daha uygun şekilde iyileşmesine bağlıdır. Yeni tip osilatörler (kuvars osilatörlerin ($\nu \sim 10^7$ Hz) yerine) olmak üzere farklı lazerler

($\nu \sim 10^{14}$ Hz) denenmektedir. Diğer tarafta ise, birincisi, spektrumun yüksek frekanslı bölgelerinde gereken AFS'lerin oluşturulması, ikincisi ise mikrodalga bölgede üretilen kararlı elektromagnetik dalganın kızılötesi ve görünen spektral bölgelere taşınabilmesiyle ilgili problemler çözülmektedir.

Şimdi pek çok laboratuvarıda He-Ne, Nd-Yag ve diyot lazerler CH_4 , I_2 , Cs, Rb, Ca gazlarının enerji geçişlerinde yüksek kararlılıkla kilitlenmektedir. (Şekil 3.13.)

Frekans kilitlenmesi için pekçok metod bulunmakla birlikte frekans kararlılığının artırılması için osilatör frekansının atomik enerji geçişlerine kilitlendiği sistemler en yaygın olanlarıdır. Bundaki en önemli iki sebep şunlardır. Birincisi, atomik özellikler evrenseldir, yani bir yerden başka bir yere gidildiğinde bu özellikler değişmezdir. Değişen tek şey atomların hareketine bağlı relativistik etkiler ve hissetikleri

yerçekimsel potansiyeldir. İkincisi ise, atomik özelliklerin zamandan bağımsız olmasıdır.

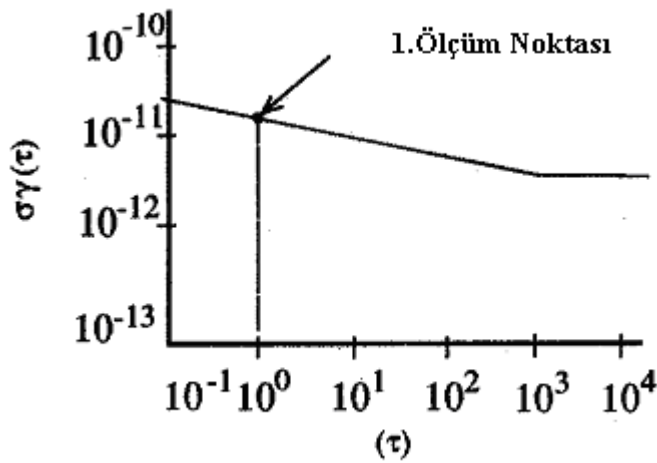


Şekil 3.13 : Atomik / Moleküler Geçişlere Kilitli Lazer Sistemi Blok Şeması

Yani temel sabitler zamanla değişmezler, bu da demektir ki enerji seviyeleri arasındaki farkları belirleyen atomlar arası etkileşimler sabit kabul edilebilir.

Lazer frekansının kararlılık ve doğruluk değerleri kitlemede kullanılan soğurum rezonansının parametrelerine de bağlıdır. Lazerle atomların etkileşimi sonucunda elde edilen bu rezonans; lazerin atomlarının hızına olan etkisinden, lazer şiddetinden etkilenmektedir.

Frekans kararlılığı hesaplanırken Allan variance istatistiki metodu kullanılmıştır. Zaman kümesinde (domaininde) osilatörlerin kısa-dönem kararlılıklarını veren standart metod Allan Variance'in kareköküdür. Genelde $\sigma_y(\tau)$ şeklinde verilir. (Şekil 3.14.)



Şekil 3.14. Allan Variance'ın Zamana Göre Değişim Grafiği

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(m-1)} \sum_{k=1}^{m-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 \quad (3.2)$$

Allan variance hesaplamasıyla ilgili konunun daha anlaşılabilir olması için aşağıdaki örnek verilebilir:

Mevcut veri değerleri sayısı, $m=9$

Ortalanmış farkların sayısı, $m-1=8$

Örnekleme zaman aralığı $\tau=1$ s

Olarak alındığında hesaplanan değerler aşağıdaki tablodaki gibi olur:

Tablo 3.1 : Karakök Allan Variance Hesaplamısındaki Veriler

Veri Değerleri (y)	Birinci Farklar $(\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)$	Birinci Farkların Karesi $(\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2$
892	-	-
809	-83	6889
823	14	196
798	-25	625
671	-127	16129
644	-27	729
883	239	57121
903	20	400
677	-226	51076

$$\sum_{k=1}^{m-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 = 133165$$

Bu veriler doğrultusunda:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{133165}{2(8)} = 8322.81$$

$$[\sigma_y^2(\tau)]^{1/2} = \sqrt{8322.81}$$

$$\sigma_y(\tau) = 91.23, \tau = 1 \text{ s}$$

Bu örnekte, veri değerleri 10^{13} ,te bir olarak alınmıştır.Klasik variance'ta (standart sapma) ise

$$\sigma^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.3)$$

dir. Klasik variance; random walk gibi sıkça gözlenen gürültü proseslerinde ıraksamaktadır, veri noktaları sayısı arttıkça variance (varyans) da artmaktadır.

Allan variance ise:

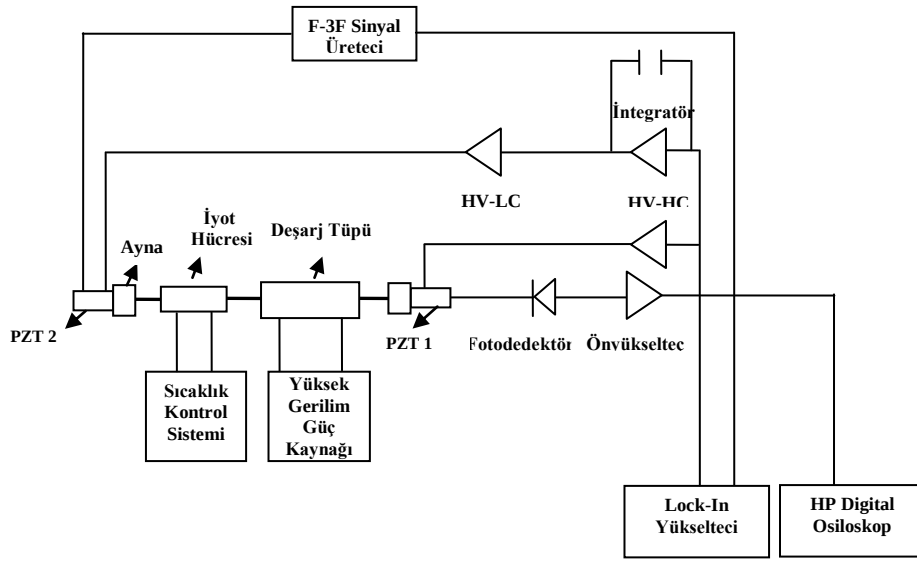
- Hassas osilatörlerde gözlenen tüm gürültü proseslerinde yakınsaktır.
- Hesaplanması kolaydır.
- Hızlı Fourier Dönüşümlerinden daha hızlı ve daha doğru gürültü proses tahminleri vermektedir.

Yukarda bahsi edilen tüm tartışmalar gözönünde bulundurularak bu çalışmada kararlılık hesaplamaları Allan Variance istatistiki metodu kullanılarak yapılmıştır [5].

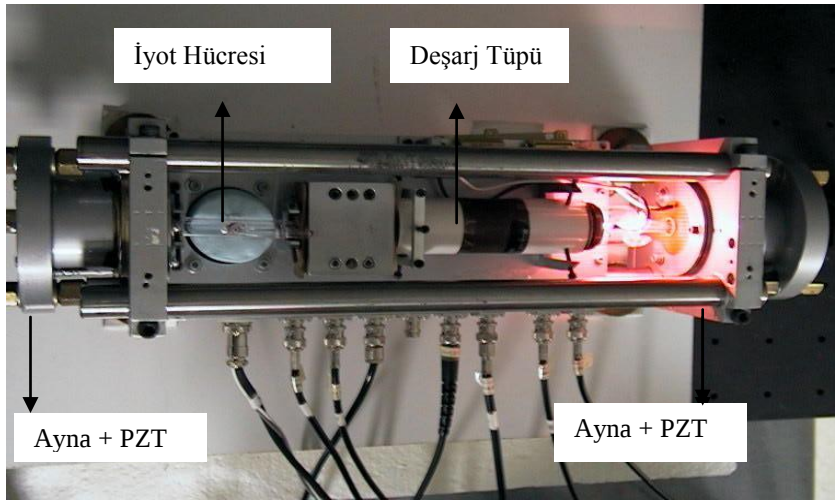
4. DENEY DÜZENEGİ VE ÖLÇÜM SONUÇLARI

4.1. He-Ne / I₂ (633 nm) Lazer Frekans Standardı Ölçüm Sistemi

Lazer ünitesinin gövdesi som alüminyumdan yapılmış iki levha ve bu iki levhayı birbirine bağlayan dört adet invar çubuktan (her biri 20mm çapında) oluşmaktadır. Her iki taraftaki levhaların içinde rezonatörü oluşturan aynalar ve aynalara yapışık olarak piezoseramik dönüştürücüler bulunmaktadır. He-Ne gaz karışımı içeren deşarj tübü ile I₂ gazının bulunduğu iyot hücresi bu iki ayna arasına yerleştirilmiştir. Deşarj tübü tarafında bulunan ayna 60 cm yarıçaplı içbükey iyot hücresi tarafındaki ise düzlem aynadır. Aynalar arası mesafe (rezonatörün boyu) 360 mm olup aynalar % 0.9 geçirgenliğe sahiptir. Sistemde frekans stabilizasyonu sağlamak amacıyla absorber olarak ¹²⁷I₂ gazının kullanılma sebebi enerji seviyelerinin HeliumNeon'un enerji seviyelerine yakın olmasıdır. He-Ne gazı ³S₂ - ²P₄ seviyeleri arasında 633 nm' de ışıma yapar. İyotta ise R(127) 11-5 geçişi kullanılır.Şekil 4.1'de lazer ünitesinin yapısı, Şekil 4.2'de resmi görülmektedir.Lazer ünitesi; iyot hücresi, deşarj tüpü, aynalar,Piezoseramik dönüştürücüler (PZT 1-PZT 2), yavaş fotodedektör, önyükselteç, F-3F sinyal üretici, Lock-In yükselteci, HP digital skop,yüksek gerilim güç kaynağı, Tetikleme devresi, sıcaklık kontrol sistemi, band-pass filitre, lag-lead filitre, integratör, HV-HC yükselteci ve HV-LC yükseltecinden oluşmaktadır.



Şekil 4.1 : Lazer Ünite Yapısı



Şekil 4.2 : Lazer Ünitesi Yapısı

İyot Hücresi; rezonatörün içine yerleştirilmiş olan iyot hücresi ile moleküler rezonanslar, bir başka deyişle iyot moleküllerinin süperince geçişleri elde edilir.

İyot hücresinin basıncı genellikle 17.3 Pa tutulmaktadır ve bu basınç değeri 15 derece sıcaklığa karşılık gelmektedir. İyodun hücresinin basıncı sıcaklık kontrol sistemi yardımıyla 1 mK civarında bir kararlılıkta sabit tutulmaktadır. Sıcaklık kontrol sistemi yardımıyla aynı zamanda iyodun sıcaklığını dolayısıyla basıncını değiştirmek mümkün olmaktadır.

Deşarj tüpü ; toplam uzunluğu 220 mm, deşarj uzunluğu ise 130 mm olan NEC marka He-Ne gaz karışımı içeren tübün her iki tarafında Brewster penceresi bulunmaktadır. Deşarj tüpü sistemde osilatör olarak kullanılmaktadır.

Aynalar ; rezonatörü oluşturan içbükey ayna (deşarj tübü tarafında) ve düzlem ayna (iyot hücresi tarafında) Spectra-Physics marka, % 0.9 geçirgenliği olan aynalardır. Aralarındaki mesafe 360 mm dir. Aynalar sistemde lazer ışık demeti oluşumu için gerekli olan amplifikasyon ve filitreme amacı için kullanılmaktadır. He-Ne deşarj tüpü 3,39 μm , 1.15 μm , 632.8 nm ve 543.5 nm ışık demeti oluşturabilmektedir. Amplifikasyon ve filitreme için kullanılan aynalar istenilen ışık demetinin seçilmesini sağlamaktadır.

Rezanatör ; içerisinde yer alan piezoseramikler üzerine monte edilmiş aynalar lazer oluşumu için gerekli olan yükseltme işlemini yapmak ve 633 nm dalga boyu için bir filitre olarak kullanılmaktadır.

Piezoseramik Dönüştürücüler ; Üzerlerine voltaj uygulandığında boyları değişen dolayısıyla rezonatörün uzunluğunun değişmesine yolaçan elemanlardır. Piezoseramikler bir kapasite gibi düşünülebilir. PZT1, ayarlanabilir tutucuya bağlı olup deşarj tüpü tarafında bulunan içbükey ayna, bu PZT'nin üzerine sabitlenmiştir. Hızlı, ama düşük duyarlıklı olan PZT1, yüksek voltaj geniş bandgenişlikli kuvvetlendiricinin (HV-HC) çıkışlarına bağlanmıştır. PZT2, ayarlanabilir tutucuya bağlı olup iyot hücresi tarafında bulunan düzlem ayna, bu PZT'nin üzerine sabitlenmiştir. Yavaş, ama yüksek duyarlıklı olan PZT2, yüksek voltaj dar bandgenişlikli kuvvetlendiricinin (HV-LC) çıkışlarına bağlanmıştır. Hızlı olan PZT3 ise modülasyon için kullanılmaktadır. Lazerlerin piezoseramikleri farklı frekanslarla sürülmektedir. Lazer.1'in modülasyon frekansı 8.46 kHz, Lazer.2'ninki 25.919 kHz, Lazer.3'ünki 26.727 kHz' dir. PZT' lerin mekanik rezonans frekanslarında sürülmeleri ekstra bir filtreleme getirdiğinden Lazer. 1 ve Lazer. 3 rezonans frekanslarında sürülmektedir. Ancak Lazer. 2' nin rezonans frekansı yüksek olduğundan mekanik rezonans frekansında sürülemez. Lazerlerin frekans stabilizasyonunda 3. harmonik kilitleme tekniği kullanılmakta olduğundan ve lock-in yükselticinin band genişliği 102 kHz ile sınırlı olduğundan 3F sinyalinin frekansı bu değerin altında olmalıdır. Lazer.2'nin rezonans frekansı 40 kHz

civarında olduğu ve 3F değeri 120 kHz olup 102 kHz sınırını aştığından Lazer.2, rezonans frekansından farklı bir değerde (25.919 kHz) sürülmüştür. Sistemde F-3F sinyal üretici olarak lock-in yükselticinin osilatörü (internal osilator) kullanılmaktadır.

Yavaş Fotodedektör ; lazeri stabilize etmek ve çıkış sinyalini dedekte etmek için kullanılır. Dedektör, UDT-455 model fotodiyot kullanılarak yapılmıştır.

Önyükselticiler ; Önyükseltici yavaş fotodiyotun dedekte etmiş olduğu lazerin çıkış sinyalini kuvvetlendirmek, kuvvetlendirmek amacıyla kullanılır.

Lock-in Yükseltici ; lazeri 3F frekanslı sinyale kilitlemek ve böylece error sinyali (discriminant curve) elde etmek amacıyla kullanılır. Stanford Research System (SRS) marka, SR850 model DSP (Digital Signal Processing). Lock-in yükselticinin içinde osilatör de bulunmaktadır. Lazere modülasyon uygulamak amacıyla, lock-in yükselticinin içinde bulunan bu osilatör kullanılır. Bu osilatör ile teorik olarak 102 kHz, $5V_{rms}$ 'e kadar sinüs sinyali uygulamak mümkündür. Ayrıca lock-in yükselticinin harmonik seçeneği de bulunmaktadır. Üçüncü harmonik kilitleme tekniği uygulandığında 3F sinyali referans olarak verileceği için uygulanacak modülasyon sinyalinin frekansı F, 34 kHz'i geçmemelidir ($34 \times 3 = 102$). Eğer beşinci harmonik tekniği kullanılacaksa bu kez de F, 20.4 kHz'i aşmamalıdır. ($20.4 \times 5 = 102$)

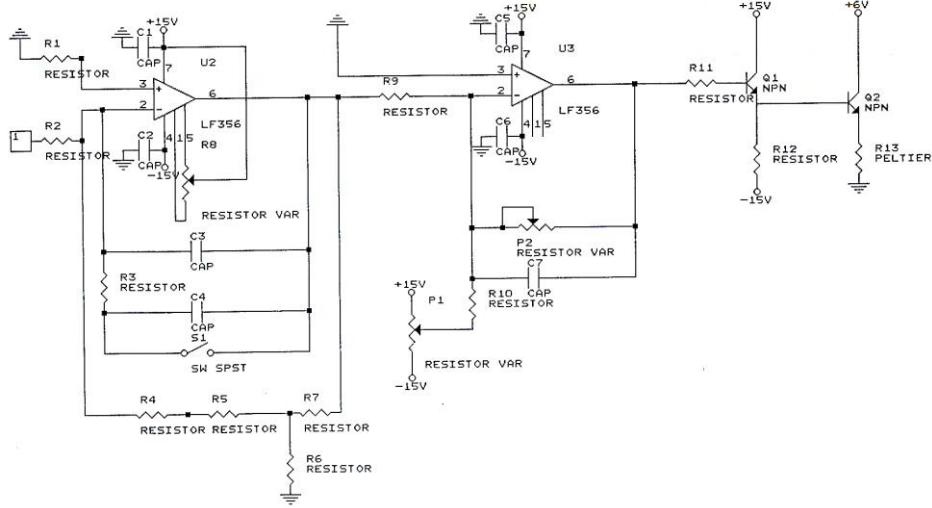
HP Dijital Skop ; Lazerin çıkış gücünü kaydetmek ve göstermek için kullanılır. Hewlett Packard marka, HP 54505A model, 400 MHz, 200 Msamples/s digitizing osiloskoptur.

Yüksek Gerilim Güç Kaynağı ; lazer tübündeki He-Ne gazı uyarmak için kullanılan, Stanford Reseach marka, PS 325/350 model yüksek voltaj kaynağıdır. PS 325 modelolanı 2500V-10mA, PS 350 modelolanı ise 5000V-5mA, her iki modelin gücü 25kW'tır. Lazerleri uyarmak için 2000 volt civarında (tüpün özelliğine göre bu değer 2250 civarına kadar çıkabilir) voltaj uygulamak gerekir.

Tetikleme Devresi ; lazer ışığının oluşması için 2000 volt uygulamak yetmez. Spark ile tüpteki gazın tetiklenmesi gerekir. Bunun için 12 voltluk bir akü ve bir tetiklerne devresi kullanılır. Aküden 12 voltluk voltaj, tetiklerne devresine uygulanır. Lazer çerçevesinin üzerinde bulunan tetikleme yazılı BNC, tetiklerne

devresinin üzerinde bulunan BNC' ye kabloyla bağlanır.Tetiklerne devresinin üzerinde bulunan anahtar açılıp kapatılır (bu işlem lazer ışık verene dek birkaç kez tekrarlanır)

Sıcaklık Kontrol Sistemi ;I₂ gazının sıcaklığını 10,13,15,17,19 °C' 1 mK kararlılıkla tutmayı sağlamaktadır. Şekil 4.3'de elektronik şeması görülmektedir. Tablo 4.1 'de devre elemanları değerleri görülmektedir.



Şekil 4.3 : Sıcaklık Kontrol Sistemi Elektronik Şeması

Tablo 4.1 : Sıcaklık Kontrol Sistemi Devre Elemanları Değerleri

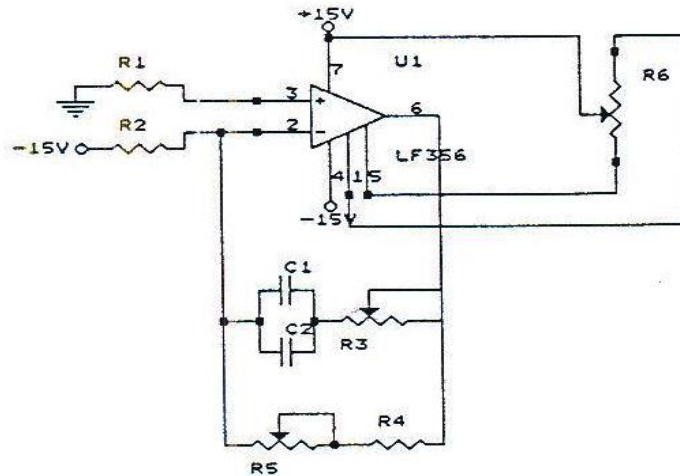
Direnç	(Ohm)	Kapasitans	(Farad)	Transistör
R 1	150K	C 1	150 n	Q 1 BD 175
R 2	150K	C 2	150 n	Q 2 BD 865
R 3	3 M	C 3	1.5 n	
R 4	10 M	C 4	2.5 n	
R 5	10 M	C 5	150 n	
R 6	680	C 6	150 n	
R 7	140 K	C 7	390 p	
R 8	25 K			
R 9	5.1 K			
R 10	3.9 K			
R 11	2.7 K			
R 12	3.09 K			

Band-Pass Filiter ; Üçüncü harmonik kilitlerne tekniği kullanıldığında, fotodedektörün çıkışında modüle edilmiş lazer sinyalindeki $3f$ bileşenini geçirip diğerlerini geçirmeyen filtredir. Lazer ışığı Lorentzian formunda olup $I(w)=1/(1+w^2)$ formülü ile ifade edilir. Bu forma sahip olan lazer ışığı $A \sin w_m t$ gibi bir sinüs dalga sinyali ile modüle edildiğinde fotodedektörün çıkışında

$$I(w+w_m) = I_0 + I_1 \sin w_m t + I_2 \sin 2 w_m t - I_3 \sin 3 w_m t + \dots$$

ile ifade edilecek sinyal oluşur. Band-Pass filtre merkez frekansı $3w$ seçilerek, $3w$ frekanslı bileşen geçirilip diğer bileşenler süzülür. Bu yapılırken $3w$ frekanslı bileşen kuvvetlendirilir ve rezonans bantgenişliği daraltılır.

Lag-Lead Filtre ; bu filtre yardımıyla düşük frekanslarda kazanç artırılır, yüksek frekanslarda ise azaltılır. Böylece servo sistemin kararlılığı artırılır. Şekil 4.4 'de elektronik şeması Tablo 4.2 'de devre elemanları değerleri görülmektedir



Şekil 4.4 : Lag-Lead Filtre Elektronik Şeması

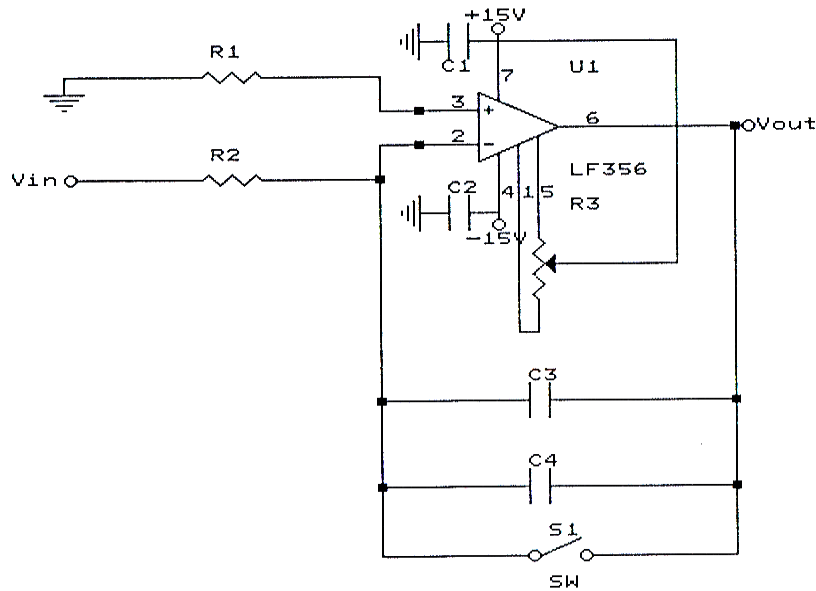
Tablo 4.2 : Lag-Lead Filtre Devre Elemanları Değerleri

Direnç	Ohm	Kapasitans	Farad
R 1	10 K	C 1	2.2μ
R 2	10 K	C 2	2.2μ
R 3	25 K		
R 4	100 K		
R 5	1 M		

İntegratör ; Ortamdaki yavaş sıcaklık değişimlerini dengeler. İntegratör giriş sinyalin integralini alarak çıkış sinyalini HV-LC yükselticinin girişine uygulanarak gerçekleşir.Şekil 4.5 ‘de elektronik şeması Tablo 4.3 ‘de devre elemanları değerleri görülmektedir.

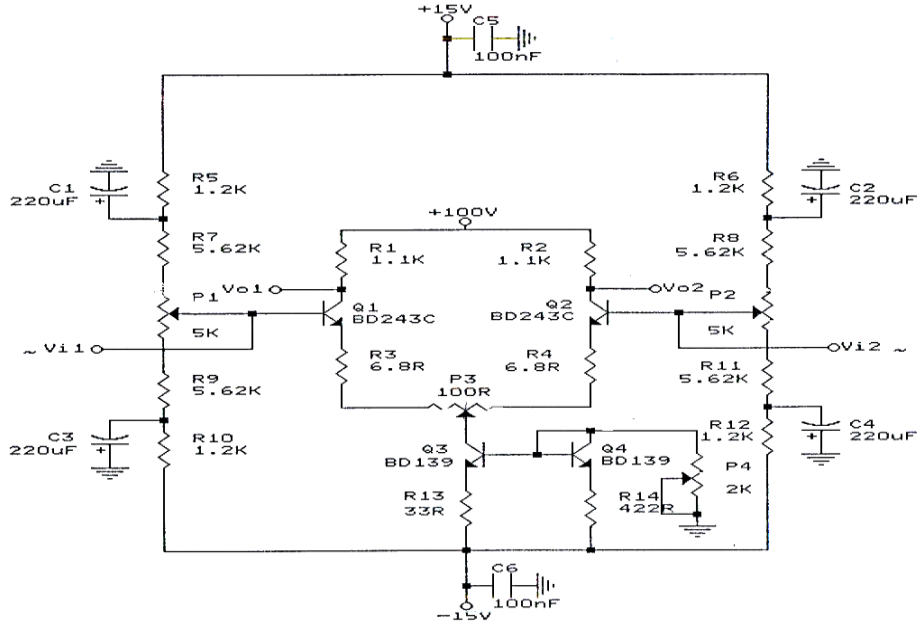
Tablo 4.3 : İntegratör Devre Elemanları Değerleri

Direnç	Ohm	Kapasitans	Farad
R 1	120 K	C 1	100 n
R 2	120 K	C 2	100 n
R 3	25 K	C 3	560 p
		C 4	2.2 μ



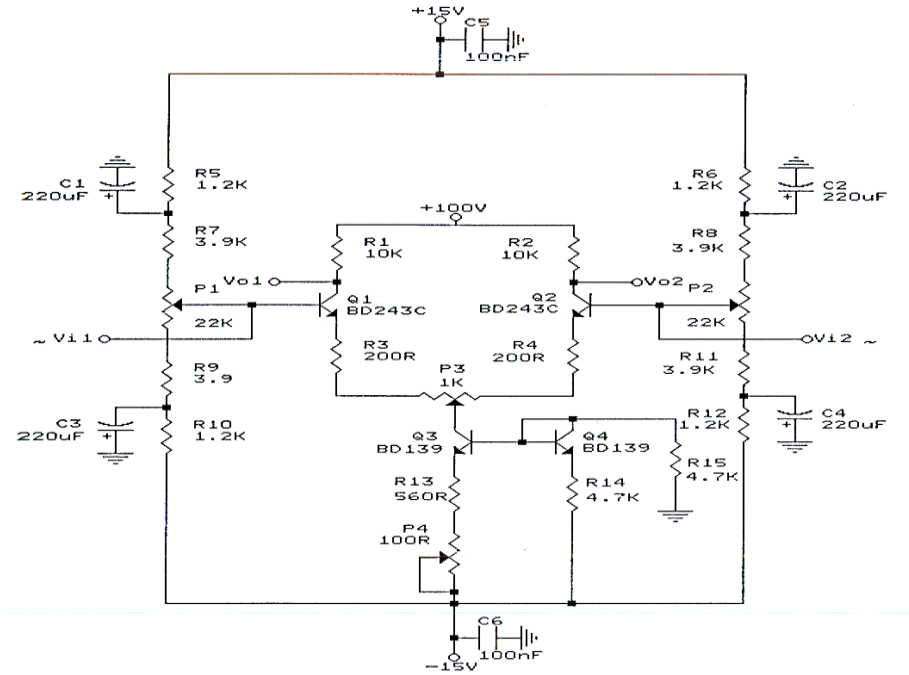
Şekil 4.5 : İntegratör Elektronik Şeması

HV-HC Yükseltici (Yüksek Voltaj Geniş Bandgenişlikli Yükseltici); girişi lag-lead filtrenin çıkışına, çıkışları ise hızlı fakat düşük duyarlıklı PZT 1'e bağlıdır.Şekil 4.6.'da elektronik şeması ve devre elemanları değerleri şema üzerinde görülmektedir.



Şekil 4.6 : HV-HC Yükseltici Elektronik Şeması

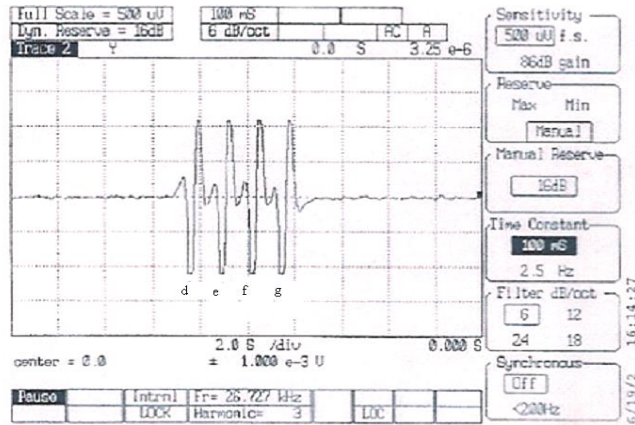
HV-LC Yükseltici (Yüksek Voltaj Dar Bandgenişlikli Yükseltici); girişi integratörün çıkışına, çıkışları ise yavaş fakat yüksek duyarlıklı PZT 2'ye bağlıdır.Şekil 4.7'de elektronik şeması ve devre elemanları değerleri şema üzerinde görülmektedir .



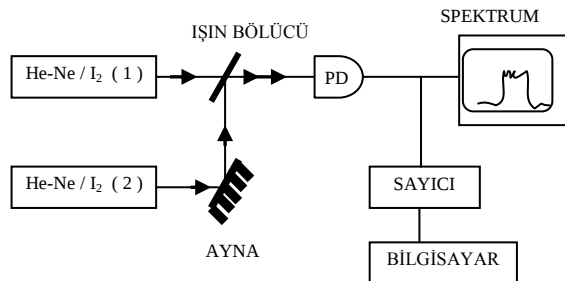
Şekil 4.7 : HV-LC Yükseltici Elektronik Şeması

4.2. Lazer Frekansına Etki Eden Parametrelerin Araştırılması

Lazerin frekansına etki eden parametreler; iyot moleküllerinin iyot hücresinde oluşturduğu basınç, lazeri iyot moleküllerinin enerji geçişlerine (d, e, f, g) 3.türevine kilitleye bilmek için lazere uygulanan modülasyonun modülasyon genişliği ve lazerin optik gücüdür. Bu parametrelerden herhangi birinin incelenmesi için ;iki adet iyotun enerji geçişine kilitli (He-Ne / I₂) lazer beat edilir ve gözlenmek istenen parametrenin enerji geçişleri (d, e, f, g) üzerindeki etkisi gözlenir. Şekil 4.8.'de iyot moleküllerinin enerji geçişleri Şekil 4.9.'de beat ölçüm düzeneği görülmektedir. Bu bölümde 3 adet He-Ne / I₂ (UME L1, UME L2, UME L3) lazerlerinin iyot moleküllerinin enerji geçişine etkisi (frekansına) etki eden parametreler (İyot gaz basıncı, Modülasyon Genişliği, Lazer güç) incelenecektir.



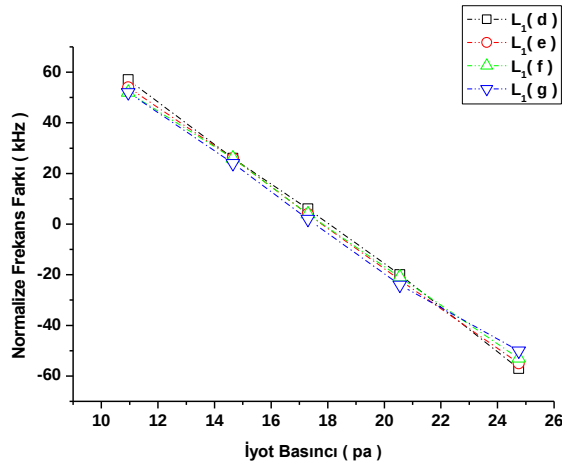
Şekil 4.8 : İyot Molekülleri Enerji Geçiş



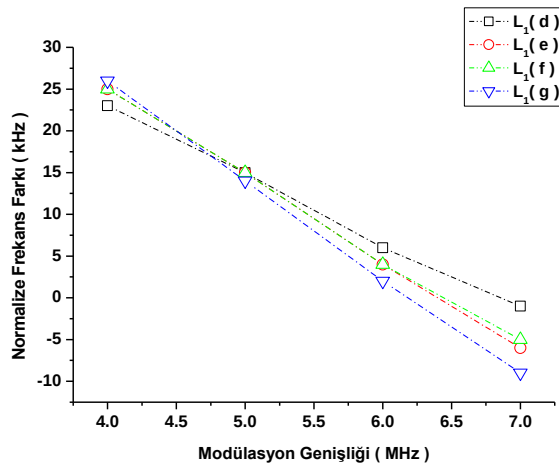
Şekil 4.9 : Beat Ölçüm Düzeneği

4.2.1. He-Ne / I₂ (UME L1) Frekans Parametrelerin Araştırılması

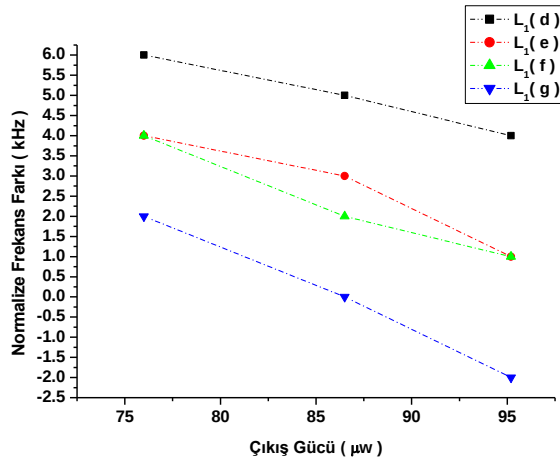
Şekil 4.10.' da He-Ne / I₂ (UME L1)lazerinin frekansına iyot molekülerinin enerji geçişlerinin (d, e, f, g); basınç değişimi etkisi, Şekil 4.11.' da modülasyon genişliği etkisi, Şekil 4.12.' de lazer optik güç değişim etkisi görülmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi He-Ne / I₂ (UME L1) lazerinin frekansı basınç, modülasyon ve optik güç parametreleri için lineer olarak değişmektedir. Tablo 4.4'de He-Ne /I₂ (UME L1)lazer frekans parametre değişimi lineer fit değerleri verilmiştir.L lineer fit değerini gösterirken U ise ölçüm belirsizliğini göstermektedir



Şekil 4.10 : UME L1 Basınç Değişimi



Şekil 4.11 : UME L1 Modülasyon Genişliği



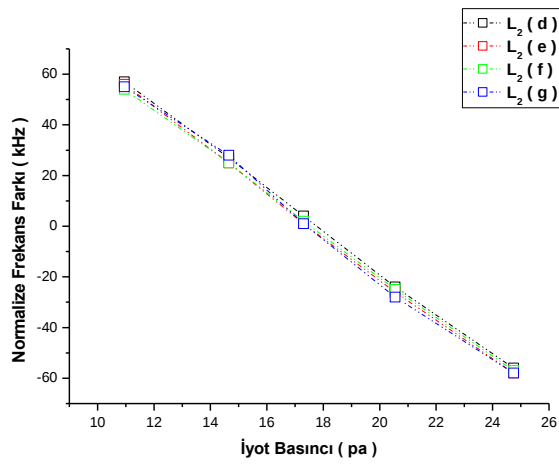
Şekil 4.12 : UME L1 Lazer Optik Güç

Tablo 4.4 : He-Ne /I₂ (UME L1)Lazer Frekans Paremetre Değişimi

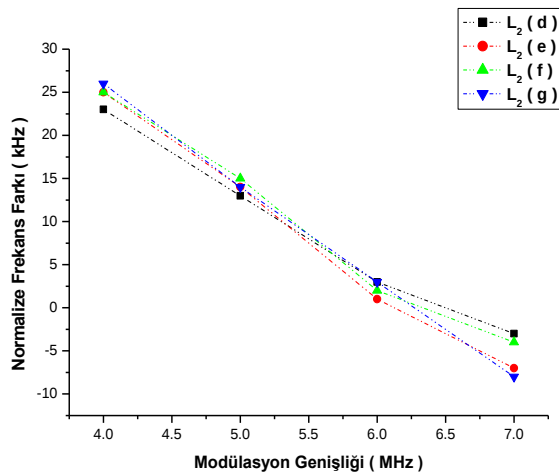
	<u>L</u>		<u>U</u>
(Δf / ΔP _{I2}) (kHz / Pa)	d	-8.2	0.1
	e	-8.0	0.1
	f	-7.7	0.1
	g	-7.5	0.2
(Δf / Δf _w) (kHz / MHz)	d	-8.1	0.3
	e	-10.4	0.2
	f	-10.1	0.3
	g	-11.7	0.2
(Δf / Δp _{ex}) (kHz / μW)	d	-0.03	0.01
	e	-0.04	0.02
	f	-0.04	0.01
	g	-0.13	0.01

4.2.2. He-Ne / I₂ (UME L2) Frekans Parametrelerin Araştırılması

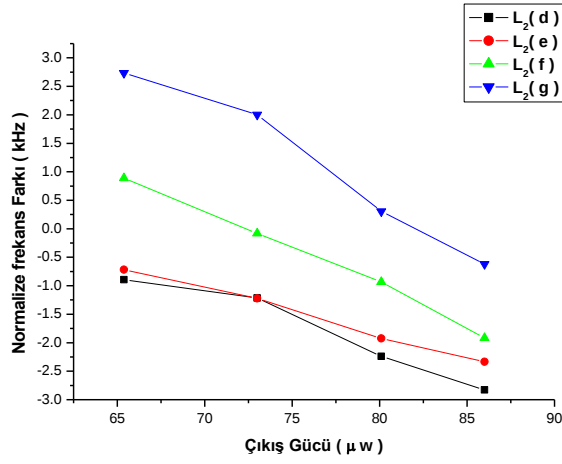
Şekil 4.13.' da He-Ne / I₂ (UME L2)lazerinin frekansına iyot molekülerinin enerji geçişlerinin (d, e, f, g); basınç değişimi etkisi, Şekil 4.14.' da modülasyon genişliği etkisi, Şekil 4.15.' de lazer optik güç değişim etkisi görülmektedir.Şekillerde görüldüğü gibi He-Ne / I₂ (UME L2) lazerinin frekansı lineer olarak değişmektedir.Tablo 4.5'de He-Ne /I₂ (UME L2)lazer frekans parametre değişimi lineer fit değerleri verilmiştir.L lineer fit değerini gösterirken U ise ölçüm belirsizliğini göstermektedir.



Şekil 4.13 : UME L2 Basınç Değişimi



Şekil 4.14 : UME L2 Modülasyon Genişliği



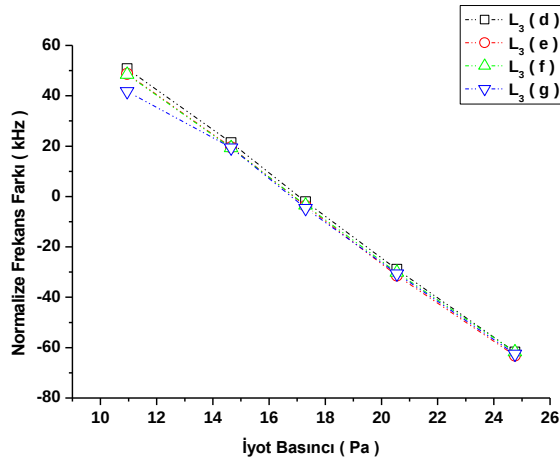
Şekil 4.15 : UME L2 Lazer Optik Güç

Tablo 4.5 : He-Ne /I₂ (UME L2)Lazer Frekans Paremetre Değişimi

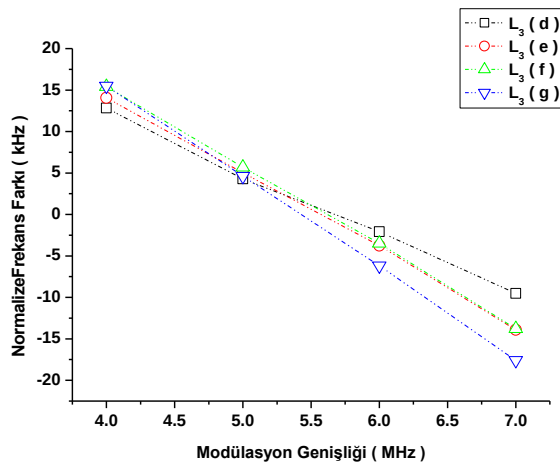
		<u>L</u>	<u>U</u>
(Δf / ΔP _{I2}) (kHz / Pa)	d	-8.3	0.1
	e	-8.3	0.2
	f	-8.1	0.1
	g	-8.4	0.1
(Δf / Δf _w) (kHz / MHz)	d	-8.8	0.6
	e	-10.9	0.7
	f	-10.0	0.9
	g	-11.3	0.2
(Δf / Δp _{ex}) (kHz / μW)	d	-0.09	0.03
	e	-0.11	0.01
	f	-0.12	0.02
	g	-0.08	0.02

4.2.3. He-Ne / I₂ (UME L3) Frekans Parametrelerin Araştırılması

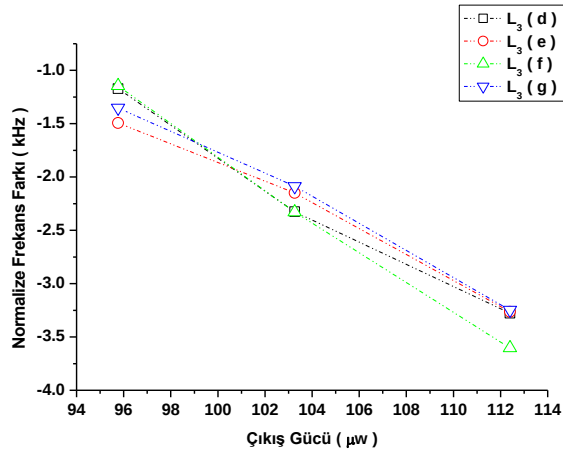
Şekil 4.16.' da He-Ne / I₂ (UME L3)lazerinin frekansına iyot molekülerinin enerji geçişlerinin (d, e, f, g); basınç değişimi etkisi, Şekil 4.17.' da modülasyon genişliği etkisi, Şekil 4.18.' de lazer optik güç değişim etkisi görülmektedir.Şekillerde görüldüğü gibi He-Ne / I₂ (UME L3) lazerinin frekansı lineer olarak değişmektedir. Tablo 4.6'de He-Ne / I₂ (UME L3)lazer frekans parametre değişimi lineer fit değerleri verilmiştir[7]. L lineer fit değerini gösterirken U ise ölçüm belirsizliğini göstermektedir.



Şekil 4.16 : UME L3 Basınç Değişimi



Şekil 4.17 : UME L3 Modülasyon Genişliği



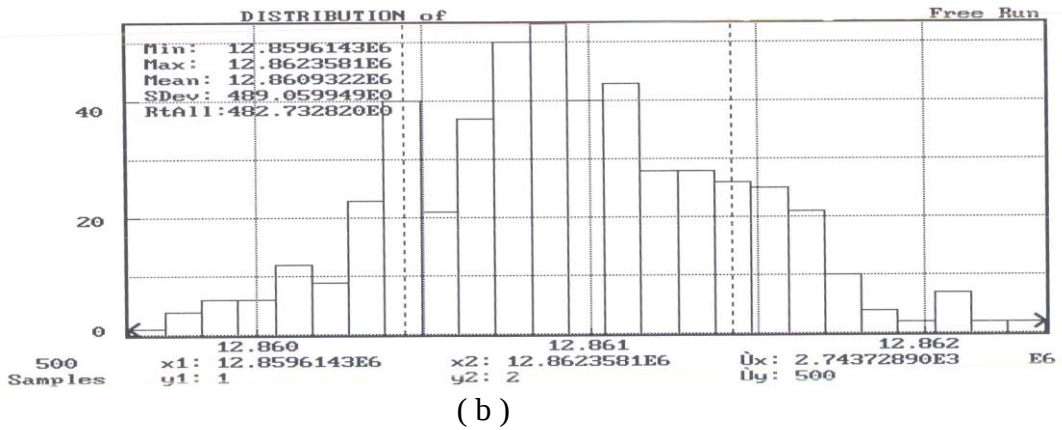
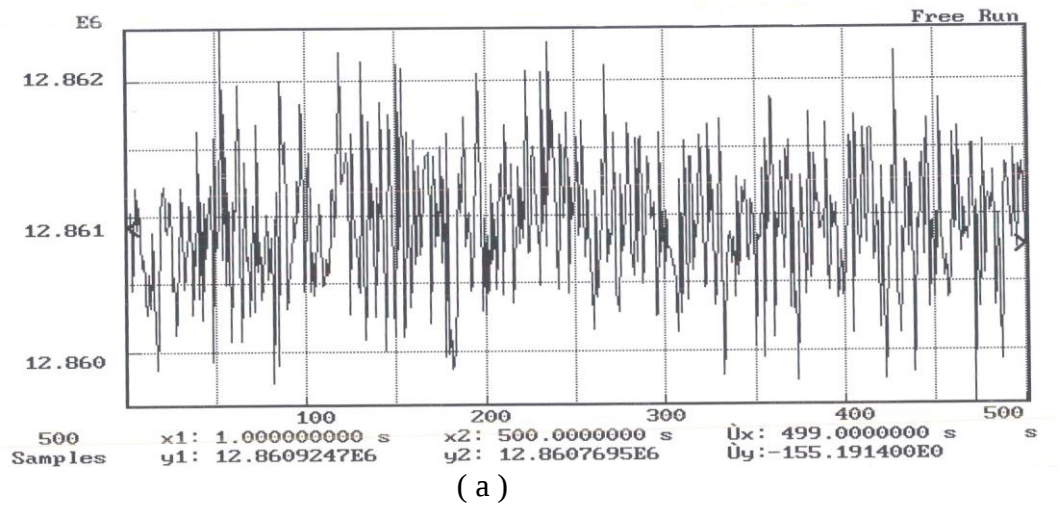
Şekil 4.18 : UME L3 Lazer Optik Güç

Tablo 4.6 : He-Ne /I₂ (UME L3)Lazer Frekans Paremetre Değişimi

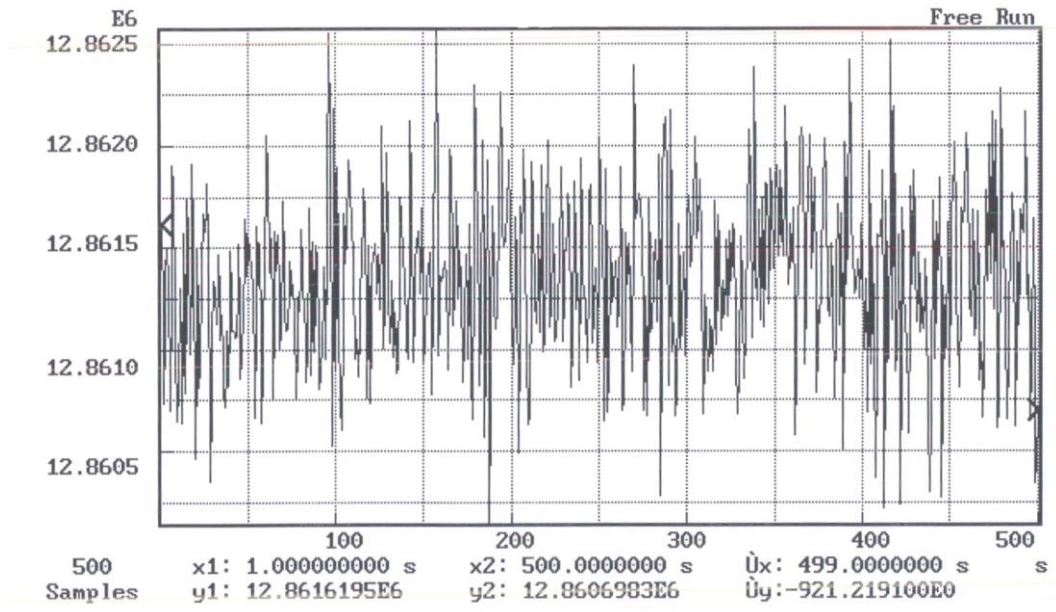
		<u>L</u>	<u>U</u>
(Δf / ΔP _{I2}) (kHz / Pa)	d	-8.2	0.1
	e	-8.2	0.1
	f	-8.0	0.1
	g	-7.7	0.1
(Δf / Δf _w) (kHz / MHz)	d	-7.3	0.1
	e	-9.3	0.2
	f	-9.7	0.2
	g	-11	0.1
(Δf / Δp _{ex}) (kHz / μW)	d	-0.13	0.01
	e	-0.11	0.01
	f	-0.13	0.01
	g	-0.11	0.01

4.3. He-Ne /I₂ (UME L1, L2,L3) Lazer Frekans Kararlılığı Araştırılması

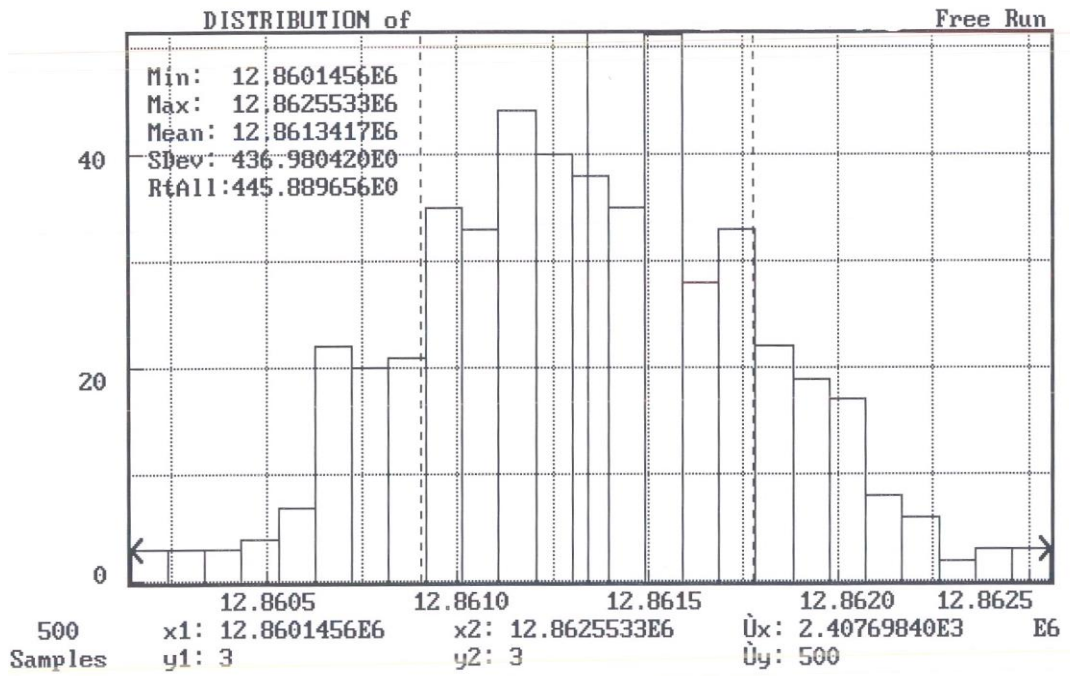
Frekans kararlılığı araştırması için , frekans kararlılığı incelenmek istenen iki adet lazer (örneğin UME L3 ve UME L2) şekil 4.9’da gösterildiği gibi beat edilir daha sonra lazerlerden her biri iyot molekülerinin enerji (d, e, f, g) geçişlerinden herhangi birine kilitlenir (her lazer farklı bir geçişe kilitlemek gerekir). Sayıcı üzerinden alınan datanın Allan Variance istatistiğine göre analiz yapıldıktan sonra frekans kararlılığı grafiği oluşturulur. Bu bölümde He-Ne / I₂ (UME L3) lazerinin frekans kararlılığı araştırması UME L1 ve UME L2 ve Uluslararası Ölçüm Bürosu’nun lazerleri olan BIPM4 ve BIW 167 beat edilerek elde edilmiş sonuçları incelenecektir.Şekillerde (Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22) verilen sonuçlar UME L3 ile adı geçen diğer lazerlere ait seçilmiş örneklerdir. Şekillerin a kısımlarında frekans değişimi grafiği b kısımlarında ise frekans değişimi elde edilen dataların Allan Variance istatistikleridir.



Şekil 4.19 : UME L3(e)-UME l(d)Frekans Kararlılığı

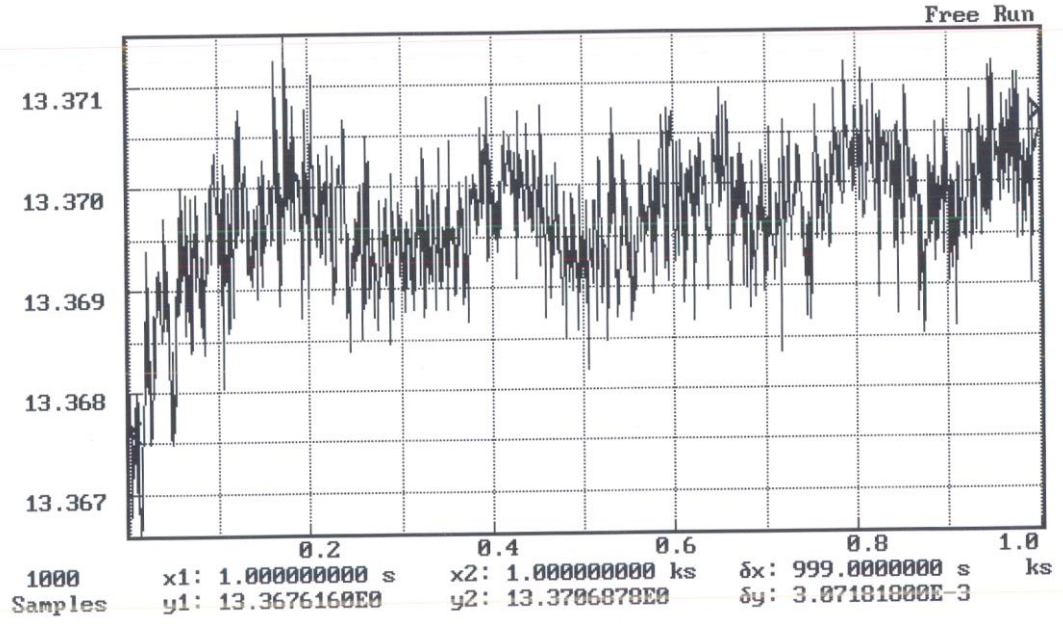


(a)

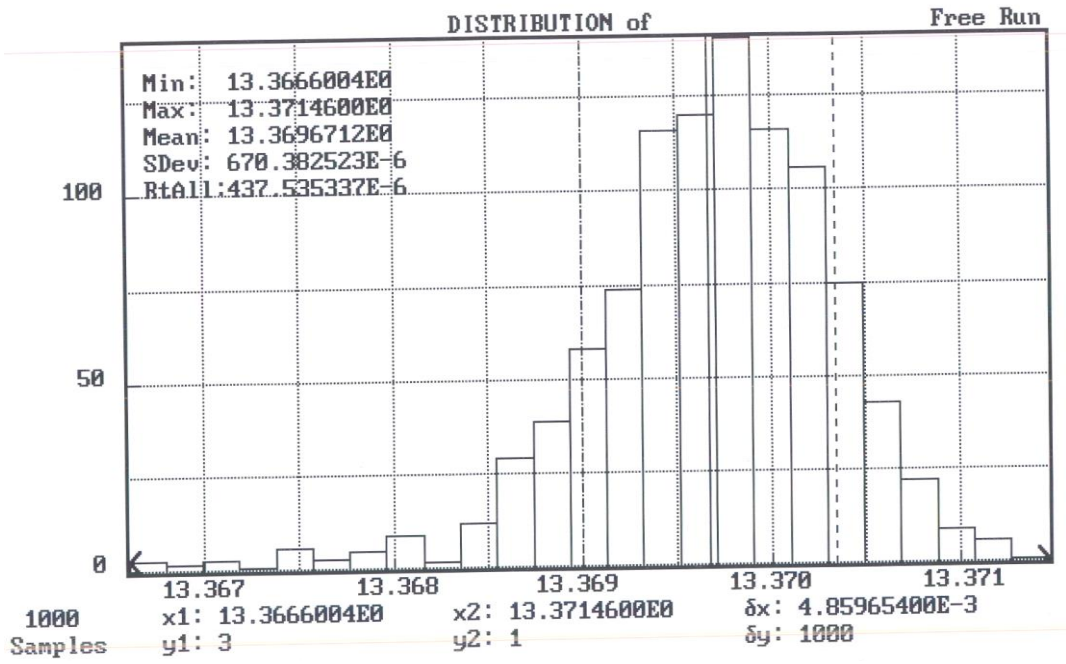


(b)

Şekil 4.20 : UME L3 (e)-UME 2 (d) Frekans Kararlılığı

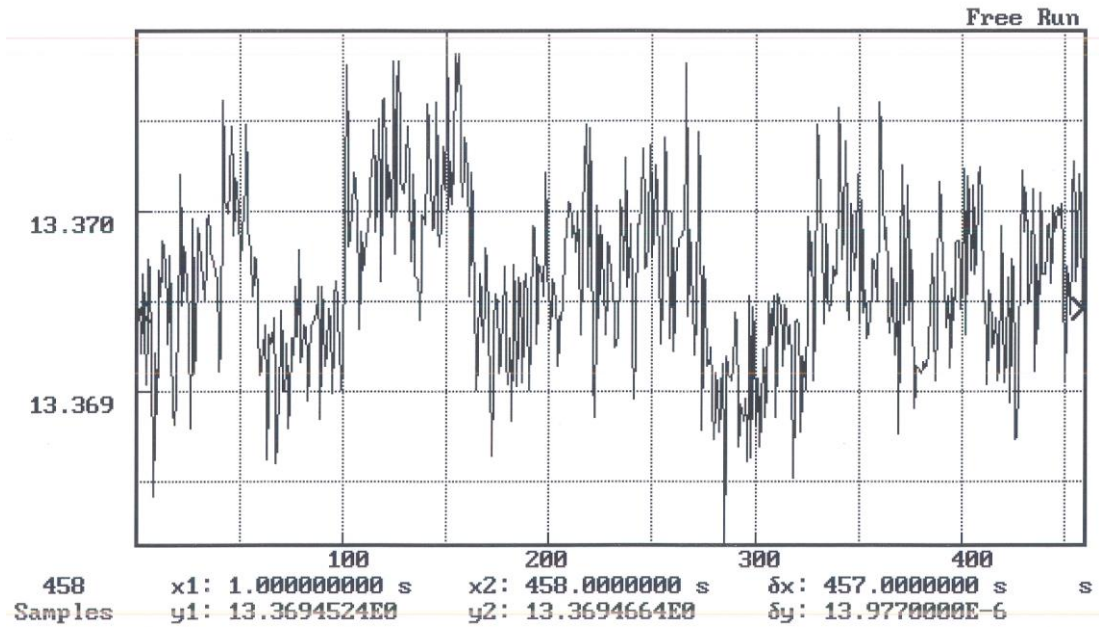


(a)

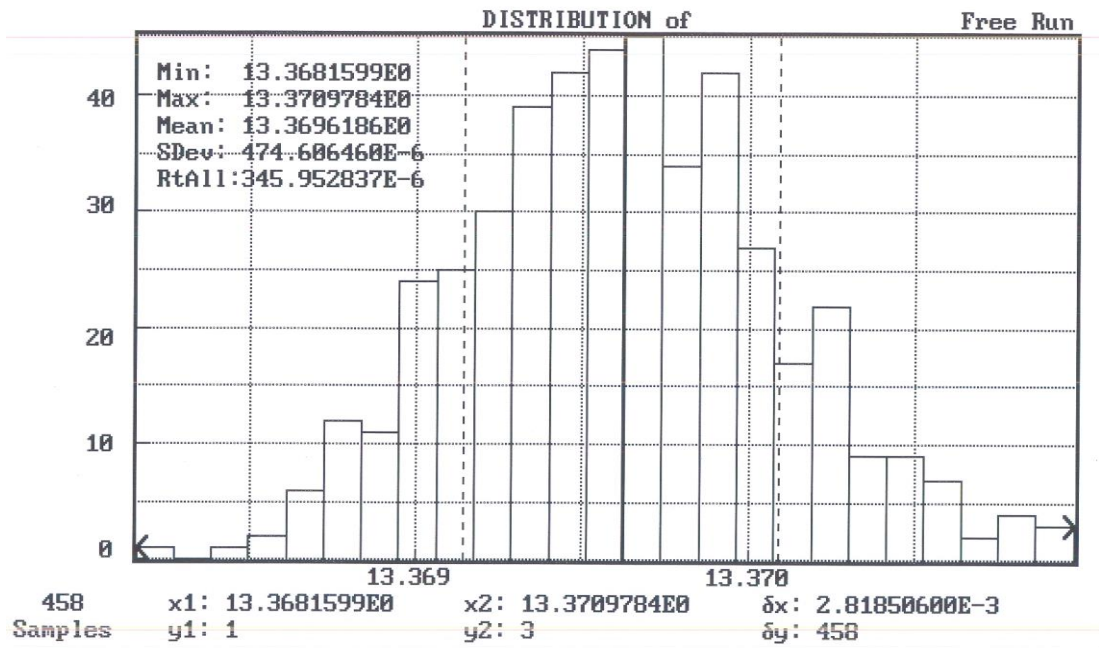


(b)

Şekil 4.21 : UME L3(e)-BIPM4(f) Frekans Kararlılığı



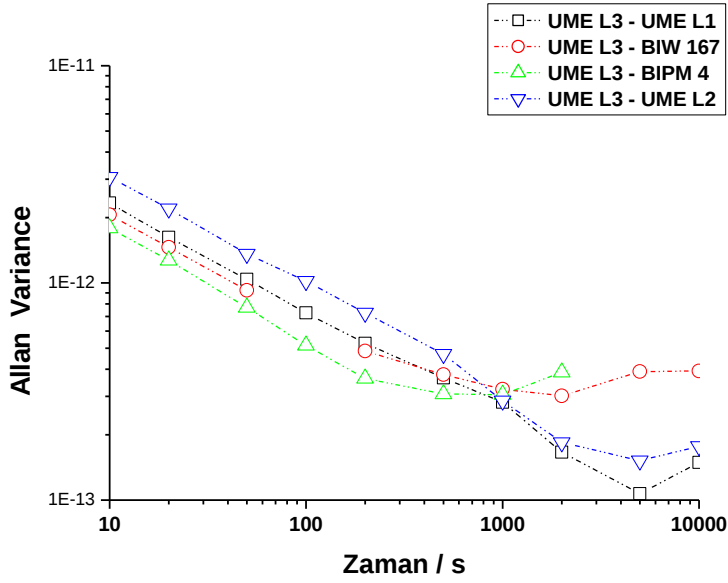
(a)



(b)

Şekil 4.22 : UME L3(e)-BIW167(f) Frekans Kararlılığı

Şekil 4.23’de UME L3’ ün frekans kararlılığı grafiği görülmektedir. Şekil 4.23’den görüleceği üzere UME-L3, ün BIW167 ve BIPM-4 lazerleri ile olan frekans kararlılığı değeri 3×10^{-13} değerine 1000 s ortalama zamanda ulaşırken UME-L3, ün UME L1 ve UME L2 lazerleri ile olan frekans kararlılığı değeri 1×10^{-13} değerine 5000 s ortalama zamanda ulaşmıştır [7]. Burdan elde edilen sonuç hem UME L3 hemde UME L1 ve UME L2 Uluslararası Ölçüm Bürosu lazerlerinden (BIW167 ,BIPM-4) daha iyi bir frekans kararlılığı değerine sahiptir.



Şekil 4.23 : UME L3 Frekans Kararlılığı

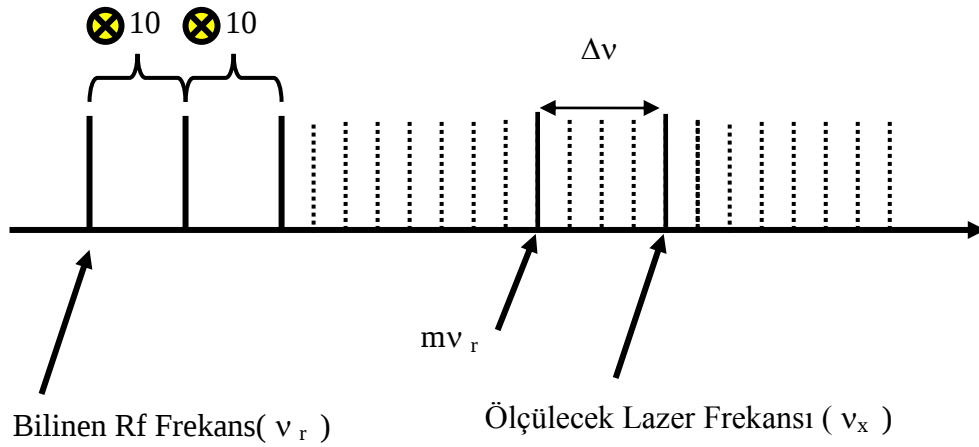
4.4. Mutlak Frekans Ölçümü

Optik Frekans ölçümü dalga boyu ölçümüne göre daha doğru bir ölçümdür çünkü dalga boyu bulunduğu ortamdaki kırılma indeksine bağlı olarak değişir bunun sebebi ışık dalgalarının düzlem dalga özelliğini kaybetmesinden kaynaklanır. Buda dalga boyu ölçümlerine bir belirsizlik getirir Eğer biz frekansı doğru ölçer isek dalga boyuna ulaşabiliriz çünkü dalga boyu $\lambda = c_0 / \nu$ eşitliği ile birbirine bağımlıdır ve frekans kırılma indeksinden bağımsızdır. Burda c_0 ışığın vakum ortamındaki hızı iken n ise ortamın kırılma indeksidir [8].

Mutlak frekans DC seviyeden 100 GHz kadar frekans sayıcılarından ölçülebilir. GHz seviyesi frekansından daha yüksek frekans ölçümleri beat tekniği ile ölçülür.

Günümüzde Mutlak Frekans Ölçümü iki ölçüm sistemi ile gerçekleştirilir. gerçekleştirilir. İlk sistem Optik Frekans Zinciri(Frequency Chain) ikincisi ise son yıllarda geliştirilen Femtosaniye Lazer Komb.

Birinci sistemde; Cs frekans standardı referans olacak şekilde bir zincir oluşturulur öyleki RF (Radyo Frekansı)' dan görünür bölgeye kadar bir spekturum elde edilir oluşan bu zincire Optik Frekans Zinciri denir. Ölçülmek istenen frekans ν_x katlanmış referans frekans $m\nu_r$ (m tam sayı) ile beat edilir ve beat signalı farkı $\Delta\nu = \nu_x - m\nu_r$ frekans sayıcıdan okunur referans (Cs frekans standardı) ve $\Delta\nu$ bilindiğinden ν_x bulunur. Şekil 4.24 'de Optik Frekans Zinciri görülmektedir.



Şekil 4.24 : Optik Frekans Zinciri

İkinci sistemde ise; mode kilitli sürekli lazerin frekans spekturumu kısa düzenli atmlar (pulse) yapısındadır öyleki bu atmlar eşit aralıklı bir yapı oluşturur(Bu yapı Şekil 4.24.'dekine benzer bir yapı oluşturur). Mode kilitli sürekli lazerin frekans spekturumunda ki atmların genişliği 30 THz kadar olabilir.Eğer lazer ışığı optik fiberin girişine uygulanırsa çıkışında faz modülasyonundan dolayı bir genişleme oluşur bu genişleme 300 THz (532 nm-1064 nm) değerine ulaşır. Femtosaniye Lazer Komb Cs frekans standırdının dan elde edilen referans sinyale kilitlendiğinde hem atmlar arası mesafe sürekli birbirini yenileyecek hemde bu atmlar frekans domaininde aynı yerde (yani kararlı olacaktır) kalacaktır. Mutlak

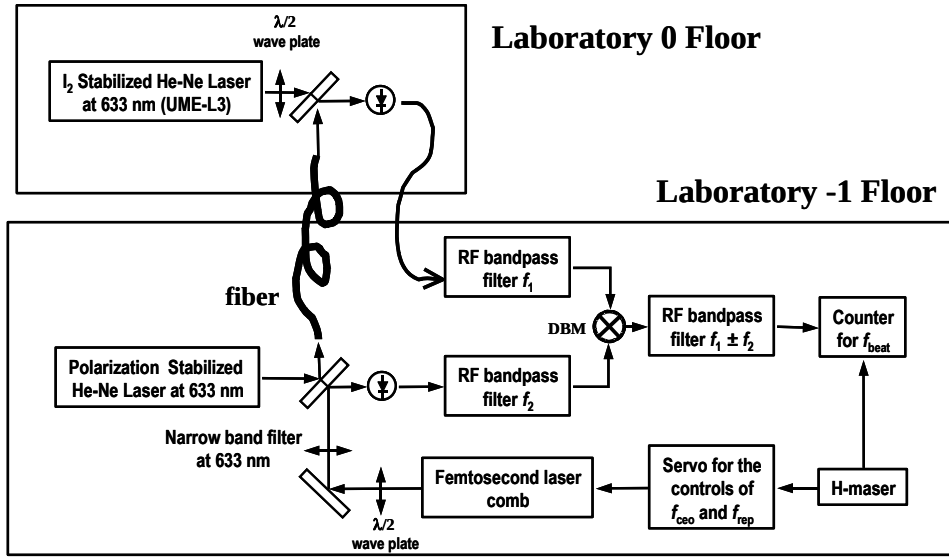
frekansı ölçülmek istenen lazer Femtosaniye Lazer Komb ile beat edilerek ölçülecektir. Resim 2 de Menlo Systems GMBH yapmış olduğu UME de bulunan Femtosaniye Lazer Komb görülmektedir.



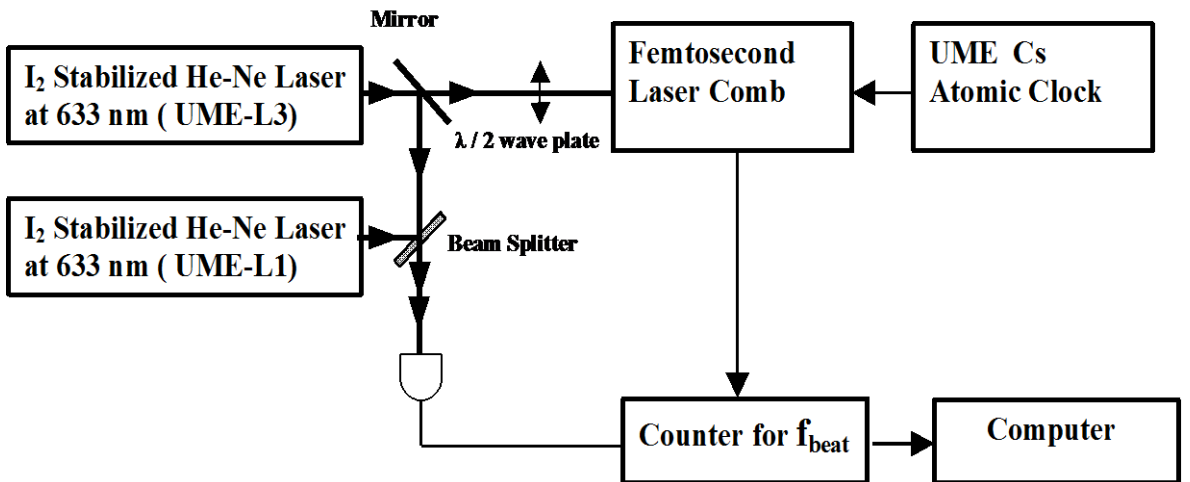
Şekil 4.25 : Femtosaniye Lazer Comb

4.5. He-Ne / I₂ (UME L3) Mutlak Frekans Ölçümü

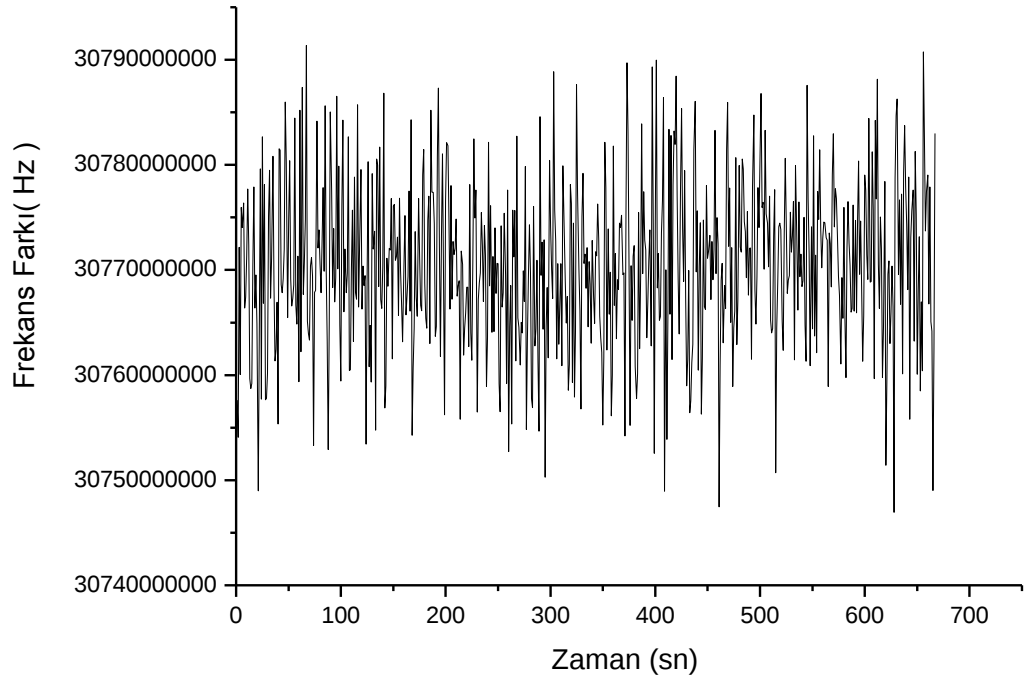
He-Ne / I₂ (UME L3) lazerinin mutlak frekansı ($f_{\text{çizgisi}}$) ölçümü hem Uluslararası Ölçüm Bürosu (BIPM) femto saniye lazer comb'u ile hemde Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) femto saniye lazer comb'u ile ölçülmüştür. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de BIPM ve UME 'de ki ölçüm düzeneği şemaları görülmektedir[7]. Şekil 4.28. ve Şekil 4.29.'da ölçümlerden elde edilen datalardan seçilmiş mutlak frekans ölçüm sonuçları görülmektedir.



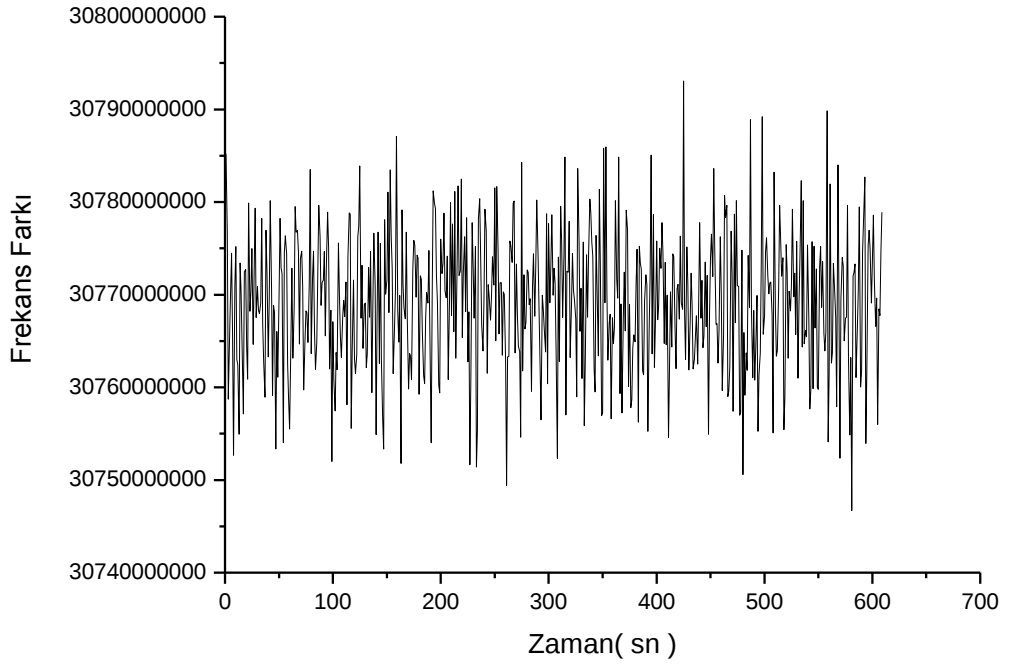
Şekil 4.26 : BIPM Ölçüm Düzenegi



Şekil 4.27 : UME Ölçüm Düzenegi



Şekil 4.28 : Mutlak Frekans Ölçümü(BIPM)



Şekil 4.29 : Mutlak Frekans Ölçümü(UME)

BIPM’ de mutlak frekans ölçümü yapılırken He-Ne / I₂ (UME L3) lazerinin gücü $84.0 \pm 1.2 \mu W$ ve lazere uygulanan modülasyonun çizgi genişliği 6.02 ± 0.10 MHz idi. Bu değerlerde He-Ne / I₂ (UME L3) lazerinin f çizgisinin frekansı $473\,612\,353\,602.0 \pm 1.1$ kHz olarak ölçülmüştür [7].

UME’ de mutlak frekans ölçümü yapılırken He-Ne / I₂ (UME L3) lazerinin gücü $79.4 \pm 0.6 \mu W$ ve lazere uygulanan modülasyonun çizgi genişliği 6.05 ± 0.10 MHz idi. Bu değerlerde He-Ne / I₂ (UME L3) lazerinin f çizgisinin frekansı $473\,612\,353\,600.6 \pm 1.1$ kHz olarak ölçülmüştür [7].

UME’de yapılan ölçüm ile BIPM’de yapılan ölçümden 1.4 kHz daha küçük olduğu gözlenmiştir. Frekans ölçümlerindeki bu farklılığın bir kısmı lazerin iki ölçümde farklı güce ve farklı modülasyon çizgi genişliğine sahip olmasındandır. Lazerin gücünün farklı güçte olmasından dolayı frekans değişimine katkısı -0.69 ± 0.09 kHz olurken, lazere uygulanan modülasyonun çizgi genişliğinin frekans değişimine katkısı -0.29 ± 0.10 kHz. olur. Lazer gücünün ve ve lazere uygulanan modülasyonun çizgi genişliğinin farklı olmasından kaynaklanan toplam frekans azalması -0.98 ± 0.22 kHz olarak hesaplanmıştır.(Bu değerler He-Ne / I₂ (UME L3) lazerinin frekans değişim eğrilerinden hesaplanır) Sonuç olarak iki ölçüm arasındaki gerçek fark 0.42 kHz dir. Bu değer He-Ne / I₂ (UME L3) lazerinin tekrarlana bilir değerinin içinde yer almaktadır [7].

5. DENEY SONUÇLARI

Bu çalışmada He Ne / I₂ (633 nm) UME uzunluk dalga boyu standartları(UME L1,UME L2,UME L3) lazerlerinin frekansına etki eden parametreler incelenmiş, UME lazerlerinin kendi aralarında ki frekans kararlılığına ve UME L3’ün Uluslararası Ölçüm Bürosu (BIPM4, BIW167) ile olan kararlılığına bakılmış ve UME L3 lazerinin f çizgisi mutlak frekans ölçümü BIPM ve UME femtosaniye comb sistemi ile gerçekleştirilmiştir.

Lazer frekansına etki eden parametrelerin enerji geçişleri için(d, e, f, g) liner değişim gösterdiği görülmüştür.frekans kararlılığı ölçüm sonuçları UME lazerlerinin daha

kararlı bir yapıya (BIPM lazerlerine göre) sahip olduğu görülmüştür. UME L3 lazerinin f çığısi mutlak frekans ölçümünün BIPM ve UME femtosaniye comb sistemleri olan ölçümleri farklılık göstermekle beraber bu farklılığın büyük bir kısmının iki ölçümler arasındaki parametrelerin farklılığından kaynaklandığı görülmüştür.

Bu ölçümler UME lazerlerinin iyi birer uzunluk dalgaboyu standardı olduklarını göstermiştir. Bu lazerler UME’de metrolojik amaçlara yönelik olarak interferometrik ölçüm yapan He-Ne free running çalışan lazerlerin kalibrasyonunda referans olarak kullanılacak ve yine UME’de dizayn edilen 0-100 cm arasındaki master blok ölçümü için tasarlanan Köster interferometresi için mutlak frekansı doğru ve kararlı birer ışık kaynağı olacaklardır.

KAYNAKLAR

- [1] **Quinn,T.J.**, 1994. Mise en Pratique of the Definition of the Metre, Metrologia , 30, 523-541.
- [2] **Wilson, J., Hawkes , J.F.B.**, 2000. Optoelectronics, Prentice-Hall,UK.
- [3] **Demtroder, W.**, 1996. Laser Spectroscopy 2nd Edition, Springer, Germany.
- [4] **İkegami, T., Sudo, S, Sakai, Y.**, 1995. Frequency Stabilization of Semiconductor Diode Lasers, Artech House, Norwood.
- [5] **Fruehauf, H.**, 1991. Precision Oscillators and the Time and Frequency Technology, Ball Efratom Comp.,Germany.
- [6] **Hamid,R. Sahin,E. Celik,M., Zucco,M. Robertsson, L., Ma, L.S.**,2004 Absolute Frequency Measurement and Comparison of UME and BIPM He-Ne/I2 , Lasers,Conference digest of Conference on Precision Electromagnetic Measurements(CPEM), 2004, 261-262.
- [7] **Hamid,R. Sahin,E. Celik,M. Özen,G, Zucco,M. Robertsson,L Ma,L.S.**, 2006. 10^{-12} level reproducibility of an iodine stabilized He-Ne laser endorsed by absolute frequency measurements in the BIPM and UME,Metrologia , 43, 106-108.
- [8] **Demtroder, W.**, 2002. Laser Spectroscopy 3 rd Edition, Springer, Germany.

10^{−12} level reproducibility of an iodine stabilized He–Ne laser endorsed by absolute frequency measurements in the BIPM and UME

Ramiz Hamid¹, Ersoy Sahin¹, Mehmet Celik¹, Gönül Özen²,
Massimo Zucco³, Lennart Robertsson³ and Long Sheng Ma³

¹ TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), PO 54, 41470, Gebze-Kocaeli, Turkey

² Istanbul Technical University (ITU), Maslak, 34469 Istanbul, Turkey

³ Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex, France

Received 7 September 2005

Published

Online at stacks.iop.org/Met/42

Abstract

The absolute frequency of the f-component for the UME laser was measured with the BIPM femtosecond laser comb to be $(473\,612\,353\,602.0 \pm 1.1)$ kHz during 3 March to 8 March, 2003 and with the UME Comb to be $(473\,612\,353\,600.6 \pm 1.1)$ kHz from 20 June to 25 June, 2005. After appropriate correction for power and modulation shifts a sub kilohertz agreement between the two measurements was found. Moreover, the relative frequency stability for different UME–BIPM laser pairs is investigated using standard heterodyne techniques and Allan variance statistics.

1. Introduction

According to the definition of the metre and the recommendations made by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) [1], a primary wavelength standard can be realized either by direct measurement of the laser frequency or by following the specifications defined in the list of recommended radiations, given that appropriate validation is provided in each case. The He–Ne laser, operating at 633 nm and frequency stabilized by saturated-absorption spectroscopy in an iodine vapour cell to hyperfine components in the R(127) 11–5 transition has been widely used for the practical realization of the definition of the metre. The validation can be obtained through heterodyne frequency comparisons between national metrology laboratories, which establish the frequency reproducibility and the stability of the systems.

The simplicity of the femtosecond laser comb as compared with traditional frequency chains has led to an increased number of absolute frequency measurements of lasers in the last few years. As a consequence, the number of international comparisons of lasers by heterodyne techniques is expected to decrease [2, 3].

An international comparison of the UME-L3 He–Ne/¹²⁷I₂ stabilized laser, which is used as a wavelength standard of the National Metrology Institute of Turkey (UME) and the BIPM-4 laser of the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) was undertaken at the BIPM in 1994 [4]. In addition, a second comparison of the UME-L3 laser with the PTB01 laser was made at PTB in 1994 [5].

However, subsequent to these comparisons the iodine cell and the discharge tube of the UME-L3 laser had been replaced with a discharge tube (NEC GLT2701A) and an iodine cell (filled at PTB in 1999) in this laser system. As the frequency of the He–Ne/I₂ laser at 633 nm is given for specified values of the laser parameters [1], it was necessary to re-investigate the laser frequency dependence on parameters such as iodine pressure, modulation amplitude and output power. This information is needed when the laser is used as a standard in applications such as frequency calibrations and interferometric measurements.

The results of sensitivity coefficient measurements of the UME-L3 laser and the frequency stability measurements between UME and the BIPM lasers are presented. The results of the absolute frequency measurement of the UME He–Ne/I₂ laser by the BIPM and the UME combs are reported, respectively.

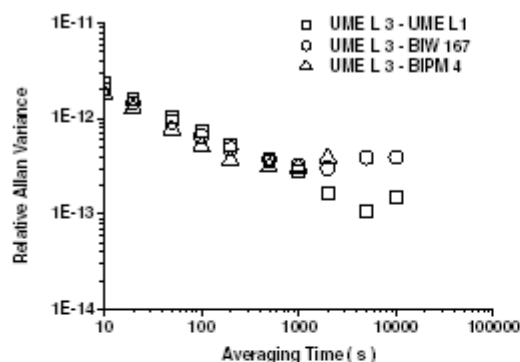


Figure 1. The relative Allan deviations for different averaging times and different pairs of lasers.

2. Sensitivity coefficient measurements

The iodine pressure, the modulation width and the output power sensitivity coefficients for the UME-L3 laser were investigated prior to this comparison. The results for the d, e, f and g-components obtained by linear regression analysis together with their uncertainties are given below, respectively.

- For the iodine pressure (kHz/Pa): -8.2 ± 0.1 , -8.2 ± 0.1 , -8.0 ± 0.1 , -7.7 ± 0.3 ;
- for the modulation width (kHz/MHz): -7.3 ± 0.1 , -9.3 ± 0.2 , -9.7 ± 0.2 , -11.0 ± 0.1 and
- for the output power (kHz/ μ W): -0.13 ± 0.01 , -0.11 ± 0.01 , -0.15 ± 0.01 , -0.11 ± 0.01 .

3. Frequency measurement

Before and after the measurements undertaken at the BIPM from 3 March to 8 March, 2003, the frequency difference $\Delta f = f_{\text{UME-L3}} - f_{\text{UME-L1}}$ between the UME-L3 and UME-L1 was determined by the matrix method at UME. This method gives the difference between the average frequency over the four components and was found to be (0.9 ± 1.1) kHz and (1.2 ± 0.5) kHz, respectively. No significant change due to the travel of the UME-L3 laser was thus observed.

The relative frequency stability for different pairs of lasers was investigated using standard heterodyne techniques. The relative Allan deviation for different averaging times and for different pairs of lasers is given in figure 1. It can be seen from this figure that under the present comparison conditions, the frequency stability of UME-L3-BIW167 and UME-L3-BIPM-4 pairs reaches a flicker floor at 3×10^{-13} for averaging times of about 1000 s. According to the frequency stability measurement at UME between two identical lasers, it is seen that the UME-L3 laser can show a comparably better long-term stability reaching the level of 1×10^{-13} for the averaging time of 5000 s.

The frequency f_t for the UME-L3 laser when locked to the f-component was measured using the BIPM frequency comb. The schematic diagram of the experimental set-up is given in figure 2. The detailed description of the experimental set-up and absolute frequency measurement of the iodine

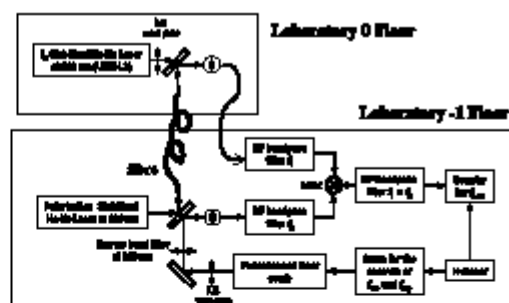


Figure 2. The schematic diagram of the BIPM experimental set-up.

stabilized He-Ne laser was presented in [6]. During the experiment, the UME-L3 He-Ne¹²⁷I₂ stabilized laser and the absolute frequency measurement system including the femtosecond laser comb and the buffer laser were located in different laboratories. Due to the low power of a He-Ne¹²⁷I₂ stabilized laser, an additional polarization stabilized He-Ne buffer laser at 633 nm was used. The light from the buffer laser was delivered by an optical fibre to the laboratory in which the UME-L3 laser was kept. The two beat signals at f_1 and f_2 frequencies (figure 2) were passed through the RF bandpass filters and mixed in a double-balance-mixer (DBM). The resulting frequency difference or the sum of two frequencies was measured by a frequency counter which was computer controlled and externally referenced to an H-maser. The weighted average of the measured frequency f of the f-component was found to be $f_t = (473\,612\,353\,602.0 \pm 1.1)$ kHz. It is important to note that the CIPM recommended value is $(473\,612\,353\,604.0 \pm 10.0)$ kHz, and the frequency of the UME-L3 laser is within the limits of the recommended value.

During the measurements, the room temperature was $(20.2 \pm 0.2)^\circ\text{C}$. Under this condition, considering that no extra thermal shielding for the laser is used, the estimated stability of the iodine cell wall temperature was better than 1°C . The cold finger temperature stability of the iodine cell during the absolute frequency measurement was less than 3 mK and the temperature was found to be 14.99°C with an uncertainty of 30 mK. Before and after the frequency measurement, the laser output power and the frequency modulation width were measured to be $(84.0 \pm 1.2) \mu\text{W}$ and (6.02 ± 0.10) MHz, respectively.

The frequency f_t for the UME-L3 laser was measured using the UME frequency comb (Menlo Systems GmbH) during 20 June to 25 June, 2005. The schematic diagram of the experimental set-up is given in figure 3. During the measurement the temperature of the laboratory was $(20.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$. To measure the frequency modulation width, the beat signal between the UME-L3 and the UME-L1 laser pair was investigated using standard heterodyne techniques. After the frequency modulation width measurement, the mirror in figure 3 is removed from the experimental set-up and the laser output beam is directly sent to the UME comb system which is externally referenced to the 10 MHz signal from the UME Cs atomic clock that has a frequency accuracy better than 1×10^{-13} . The weighted average of the measured frequency f

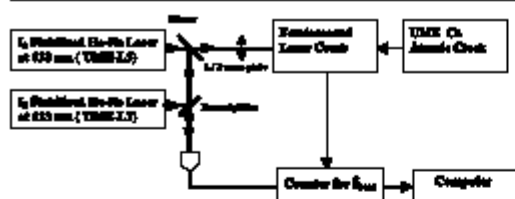


Figure 3. The schematic diagram of the UME experimental set-up.

of the f-component was found to be $f_f = (473\,612\,353\,600.6 \pm 1.1)$ kHz. This absolute frequency measurement value is 1.4 kHz lower than the BIPM measured value. Before and after the absolute frequency measurement, the laser output power and the frequency modulation width were measured to be (79.4 ± 0.6) μ W and (6.05 ± 0.10) MHz, respectively.

As a result, if the laser parameters for the two absolute frequency measurements carried out at the BIPM and at the UME were set to the same values, the difference between the measurements would be 0.42 kHz. This value is consistent with the estimated limits of the frequency reproducibility of the UME-L3 laser.

The uncertainty in the value of the working parameters and conditions can be translated into a frequency uncertainty of the UME-L3 laser at the time of the measurement. This uncertainty was estimated to be 1.1 kHz for a coverage factor $k = 1$ which is given as an indication of expected level of the reproducibility of the UME-L3 laser.

The uncertainty in the absolute frequency determination from the absolute frequency measurement system was estimated to be 0.1 kHz.

4. Conclusion

The relative frequency stability for different UME-BIPM laser pairs was investigated using standard heterodyne techniques and Allan deviation statistics, and the results were compared with those obtained from the measurements of

the UME and the BIPM reference He-Ne/ $^{27}\text{I}_2$ lasers carried out at the BIPM in March 2003. The absolute frequency of the f component for the UME-L3 laser was measured by the BIPM femtosecond laser comb and was found to be $(473\,612\,353\,602.0 \pm 1.1)$ kHz. It was also measured by the UME femtosecond comb in June 2005 and was found to be $(473\,612\,353\,600.6 \pm 1.1)$ kHz. The frequency difference between the two measurements was 1.4 ± 1.1 kHz. This frequency difference is consistent with the expected shifts caused by the differences in laser output power and the frequency modulation width.

The experimental results presented in this work may be used for the analysis of the long term behaviour of the He-Ne/ $^{27}\text{I}_2$ stabilized lasers for length metrology.

References

- [1] Quinn T J 2003 Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001) *Metrologia* 40 103–33
- [2] Diddams S A, Jones D J, Ye J, Cundiff S T, Hall J, Ranka J K, Windeler R S, Holzwarth R, Udem T and Hansch T W 2000 Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb *Phys. Rev. Lett.* 84 5102–5
- [3] Ye J, Yoon T H, Hall L, Madej A A, Bernard J E, Siemsen K J, Marnett L, Chartier J M and Chartier A 2000 Accuracy comparison of absolute optical frequency measurement between harmonic-generation synthesis and a frequency-division femtosecond comb *Phys. Rev. Lett.* 85 3797–800
- [4] Erin M, Malinovsky I, Titov A, Chartier A and Chartier J M 1995/1996 Comparison between the He-Ne laser wavelength standards at 633 nm from the UME and the BIPM *Metrologia* 32 363–5
- [5] Erin M, Karaböce B, Malinovsky I, Titov A, Uğur H, Darnedde H and Riehle F 1995/1996 Progress in stabilization of the He-Ne/ $^{27}\text{I}_2$ wavelength standard at 633 nm and the results of an international comparison between the PTB and the UME *Metrologia* 32 301–10
- [6] Ma L S, Picard S, Zucco M, Chartier J M, Robertson L and Windeler R S 2004 Direct measurement of the absolute frequency of the international reference laser BIPM4 *Metrologia* 41 65–8

ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Ankara’da doğdu. Evli ve bir çocuk babasıdır. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara’da tamamladı. 1994 yılında girdiği Ankara Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nden 1998 yılında bölüm birinciliği ile mezun oldu. 1999 Kasım - 2000 Temmuz tarihleri arasında askerlik görevini kısa dönem erbaş olarak yerine getirdi. 1999 Şubat ayından itibaren TÜBİTAK-Ulusal Metroloji Enstitüsü, Elektro Manyetik Metroloji Grubu Dalga Boyu Standartları Laboratuvarlarında araştırmacı olarak görev yapmaktadır. Dalga boyu standartları, uygulamaları ilgili çeşitli dergi ve konferanslarda sunulmuş 5 adet bilimsel çalışması bulunmaktadır.