

**HARİCİ OPTİK SALINICILI YARI İLETKEN DİYOT
LAZER SİSTEMLERİNDE SAYDAM FREKANS
SEÇİCİ KİRİNİM AĞI KULLANILMASI VE
AKORTLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

SEMA BACANAK

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MERSİN
TEMMUZ – 2014**

**HARİCİ OPTİK SALINICILI YARI İLETKEN DİYOT
LAZER SİSTEMLERİNDE SAYDAM FREKANS
SEÇİCİ KİRİNİM AĞI KULLANILMASI VE
AKORTLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

SEMA BACANAK

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. İbrahim KÜÇÜKKARA**

**MERSİN
TEMMUZ – 2014**

Sema BACANAK tarafından Yrd. Doç. Dr. İbrahim KÜÇÜKKARA danışmanlığında hazırlanan “ Harici Optik Salımcılı Yarı İletken Diyot Lazer Sistemlerinde Saydam Frekans Seçici Kırınım Ağı Kullanılması Ve Akortlama Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet Murat GİZİR

Doç. Dr. Kasım OCAKOĞLU

Yrd. Doç. Dr. İbrahim KÜÇÜKKARA

İmza



Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 16./07/2014 tarih ve 2014.16./472 sayılı kararıyla onaylanmıştır.


Doç. Dr. Mehmet KÜÇÜKASLAN
Enstitü Müdürü



HARİCİ OPTİK SALINICILI YARI İLETKEN DİYOT LAZER SİSTEMLERİNDE SAYDAM FREKANS SEÇİCİ KIRINIM AĞI KULLANILMASI VE AKORTLAMA ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Sema BACANAK

ÖZ

Atom-Işık etkileşmelerine dayanan araştırmalarda dar bantlı ve akortlanabilir lazer sistemleri oldukça önemli işlevlere sahiptir. Genellikle bu tür araştırmalarda boya lazerler veya Nd: YAG lazerleri tarafından pompalanan optik parametrik osilatörler kullanılmaktadır. Ancak bu lazer çeşitlerinin kurulum ve işletim maliyetlerinin çok yüksek olmasının yanında operasyonlarının da son derece zor olması ve hassas işlemler gerektirmesi bu sistemlerin en olumsuz yanlarındandır.

Lazer diyotlarının geliştirilmesi ve yaygınlaşmasıyla birlikte Harici Optik Salıncılı Diyot Lazer (HOSDL) sistemleri akortlanabilir lazer sınıfı içinde önemli bir alternatif haline gelmiştir. HOSDL sistemi lazer diyotun çıkışına koyulan geri besleme ve frekans seçici olarak kullanılan bir filtre (kırınım ızgarası) yardımıyla istenilen frekansta ışımaya yapmaya zorlanma ilkesine dayanarak çalışmaktadır. HOSDL sisteminin kurulum ve işletim maliyetinin diğer alternatiflerine göre oldukça düşük olmasının yanında, oldukça güvenli, az yer kaplayan, düşük enerji tüketimi ve pratik olması bu sistemlerin gelecekte araştırmalarda daha önemli roller üstleneceğini ortaya koymaktadır.

HOSDL sisteminde lazer diyotu ve frekans seçici arasındaki geometri önemli bir yer tutmaktadır. Genellikle frekans seçici ve geri besleme birimi olarak yansıtıcı kırınım ızgara Littrow konfigürasyonunda kullanılmaktadır. Bu kurulum şekli, basit ve sağlam olmasına rağmen, frekans seçme işlemiyle birlikte sistemin çıkış ışınının doğrultusunda sapma olmaktadır. Bu durum, deneylerde optik düzeneğin yeniden hizalanması ve sağlanan verilerin yeniden elde edilebilirliğini olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuzluğu gidermek için Littman konfigürasyonu denilen ve kırınım ızgarasına paralel yerleştirilen ışın sapmasını telafi edici bir düz ayna kullanılmaktadır. Ancak bu iyileştirme, sistemi karmaşık ve hareketli ayna nedeniyle daha hassas hale getirmektedir.

Sunduğumuz tezde amacımız; yeni bir optik eleman olan *saydam kırınım ızgarası* kullanarak, Littrow konfigürasyonunda 658 nm, sürekli ışıklı (cw), akortlanabilen HOSDL sistemi tasarlamak, kurmak ve çalıştırmaktır. Bu yolla saydam kırınım ızgarası kullanarak Littrow konfigürasyonu ile oluşturulan düzenekte akortlama sırasında oluşan ışın kaymasının önüne geçilerek ışın kalitesi ve tekrarlanabilirlik yönünden daha kararlı ve güvenilir bir sistem elde edilmesi hedeflenmektedir.

Anahtar kelimeler: Harici optik salıncılı diyot lazer sistemleri, lazer spektroskopisi, lazer fiziği.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. İbrahim Küçükpara, Mersin Üniversitesi, Fizik Ana Bilim Dalı

USING TRANSMISSION FREQUENCY SELECTIVE DIFFRACTION GRATING AT EXTERNAL CAVITY SEMICONDUCTOR DIODE LASER (ECDL) SYSTEMS AND RESEARCHING INTO TUNING PROPERTIES

Sema BACANAK

ABSTRACT

In the researches based on laser-atom interaction, a narrow width, tuneable laser system is the most critical component. Generally these types of investigations are committed by dye lasers or optical parametric oscillators pumped by Nd: YAG lasers. However, construction and running costs as well as operation difficulties are the major difficulties of these type lasers.

Improvements of the laser diode manufacturing industry makes the External Cavity Diode Laser (ECDL) systems very important alternative in tuneable laser class. In an ECDL system, a filter (usually diffraction grating) used for feedback a frequency selective element forced the optical oscillator of the system to oscillate with the desired frequency. ECDL system is a cheaper from aspects of the construction and running cost as well as being reliable, practical, less energy consumption. Those features show that ECDL systems will have an important role in the experimental researches in near future.

In an ECDL system the geometry between laser diode and frequency selection element is a very critical issue. Usually, the laser diode and a reflection diffraction grating used for frequency selection and feedback element are configured as Littrow configuration. Although Littrow configuration a simple and robust during the tuning process, the output beam diverges from the original position. This is a critical disadvantage and a drawback of the Littrow configuration during the experiments as it requires realigning of the output beam position for each data gathering process and also restricts reproducibility of the data collected. To overcome this problem a moving mirror is placed in front of the diffraction grating so as to be Littman geometry which is dye lasers cavity configuration. Littman configuration also brings some important problems by affecting the sensitivity of the system due to the moving mirror.

The goal of this research proposal is to design, construct and examine a narrow bandwidth 658 nm continuous wave (cw) ECDL with *transmission diffraction grating* in the Littrow configuration. By using a transmission grating we are aiming at a stable and reliable laser system by overcoming the output beam divergence problem during the tuning (scanning) process.

Keywords: External cavity diode laser systems (ECDLS), laser spectroscopy, laser physics.

Advisor: Assoc. Yrd. Doç. Dr. İbrahim KÜÇÜKKARA, Department of Physics, University of Mersin

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden desteğini esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. İbrahim KÜÇÜKKARA'ya, yüksek lisans tez savunma sınavı jürilerim Prof. Dr. A. Murat GİZİR'e, Doç. Dr. Kasım OCAKOĞLU'na ve Yrd. Doç. Dr. Serdar YILMAZ'a, maddi ve manevi destekleriyle beni bu günlerime getiren annem Neriman BACANAK'a ve canım babam Kaya Ziya BACANAK'a, varlığı yaşama sevincim olan canım kardeşim Çağlar BACANAK'a, laboratuarda her türlü desteği sağlayan, bilgilerini benden esirgemeyen, her konuda destekçim olan laboratuvar arkadaşım Barış POLAT'a, yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlarını esirgemeyen Fen Bilimleri Enstitü Müdürü Doç. Dr. Mehmet KÜÇÜKASLAN'a, Fen Bilimleri Enstitü Sekreteri Nazmiye GÖKÇEL'e, Fen Bilimleri Enstitüsü Öğrenci İşleri Sorumluları Aslan TUFAN'a ve Vedat TÜRAKÇI'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
2.1. IŞIK KAYNAKLARI VE IŞIĞIN YAPISAL NİTELİKLERİ	2
2.2. LAZER IŞIĞININ ÖZELLİKLERİ	8
2.2.1. Tek Renklilik.....	8
2.2.2. Yönlenebilirlik	10
2.2.3. Eş Evreli Olma	11
2.2.4. Uzaklaştıkça Dağılma	12
2.3. LAZER İŞLEMİ	14
2.3.1. Atomların Uyarılması.....	15
2.3.2. Einstein Bağlantıları	17
2.3.3. Nüfus Tersinmesi	18
2.3.4. Optik Geri Besleme.....	22
2.3.5. Lazer Kipleri	23
2.3.5.1. Eksenel modlar.....	24
2.3.5.2. Enine modlar	26
2.4. LAZER ÇEŞİTLERİ.....	29

2.4.1. Katı Hal Lazerler.....	30
2.4.2. Boya Lazerler	33
2.4.3. Gaz Lazerler	35
2.5. YARI İLETKEN DİYOT LAZERLER	38
2.5.1. Diyot Lazerlerin Çalışma Prensipleri	40
2.5.2. Eklem Tipleri	41
2.5.3. Diyot Lazerlerin Karakteristikleri ve Uygulama Alanları	43
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	46
3.1. HARİCİ OPTİK SALINICILI DİYOT LAZER SİSTEMİ	46
3.1.1. Sistemin Bileşenleri	48
3.1.1.1. Lazer kafası	49
3.1.1.2. Optik izolatör	50
3.1.1.3. Montaj platformu	50
3.1.1.4. Geri besleme bölümü	51
3.1.2. Frekans Seçici Elemanlar	52
3.1.2.1. Yansıtıcı kırınım ızgarası	54
3.1.2.2. Saydam kırınım ızgarası.....	57
3.1.3. Sistemin Kurulması ve Çalıştırılması	60
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	70
4.1. SİSTEMİN MATEMATİKSEL HESABI	70
4.1.1. Kırınım Denklemi	70
4.1.2. Lazer Kovuğunun Bant Genişliği Ölçümü.....	70
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ.....	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Young'ın çift yarıktaki girişim deneyi.....	3
Şekil 2.2. Fotoelektrik olay	4
Şekil 2.3. Compton saçılması.....	5
Şekil 2.4. Beyaz ışığın bir prizma yardımıyla renklerine ayrılması.....	8
Şekil 2.5. Lazer içerisinde oluşan farklı frekanslı iki ışığın kıyaslanması.....	9
Şekil 2.6. Lazer rezonatöründen geçen ışın	10
Şekil 2.7. Lazer ışınında enerji dağılımı	12
Şekil 2.8. Lazeri oluşturan temel elemanlar.....	14
Şekil 2.9. İki enerji seviyeli sistem	15
Şekil 2.10. Uyarılmış soğurma, kendiliğinden salınım ve uyarılmış salınım enerji seviyeleri diyagramı.....	16
Şekil 2.11. İki enerjili sistemin ısı dengedeki nüfus durumu.....	18
Şekil 2.12. İki enerji seviyeli sistemin nüfus tersinmesi sonrası nüfusu.....	19
Şekil 2.13. Üç enerji seviyeli sistemde pompalama olmadan önceki Boltzmann dağılımı	20
Şekil 2.14. Üç enerji seviyeli sistemde pompalama olduktan sonraki Boltzmann dağılımı içeren geçişler	21
Şekil 2.15. Lazerlerde kullanılan rezonatör ayna çeşitleri	23
Şekil 2.16. Lazerin içerisindeki geçiş çizgilerinin genişletilmiş hali.....	24
Şekil 2.17. Lazerin içerisindeki modların görünümü.....	25
Şekil 2.18. Lazer içerisindeki kazanç eğrisi.....	26
Şekil 2.19. Lazerin içinde bulunan iki ayna arasında salınım yapan ışın demetinin gösterimi.....	27
Şekil 2.20. Lazer rezonatöründe TEM ₀₀ modu	28
Şekil 2.21. Theodore Maiman'ın 1960 yılında çalıştırmış olduğu ilk yakut lazer.....	29
Şekil 2.22. Xenon lamba ile çalışan Nd:YAG katı hal lazeri.....	31
Şekil 2.23. Boya lazerinin şematik gösterimi	34
Şekil 2.24. Boya lazerin genel görünümü	35
Şekil 2.25. Gaz lazerlerin genel çalışma yapısı.....	36
Şekil 2.26. CO ₂ gaz lazerinin iç yapısı.....	37
Şekil 2.27. Yarı iletken tipine göre enerji seviyeleri.....	39
Şekil 2.28. Birleştirilmiş PN tipi yarı iletken.....	40
Şekil 2.29. P ve N tipi yarı iletkenlerin birleştirilme şeması	41
Şekil 2.30. PN tipi yarı iletken diyot yapısı	42

Şekil 2.31. Yarı iletkenin aktif bölge ve mod yapısı.....	43
Şekil 2.32. Yarı iletken diyot lazerin sıcaklığa bağlı olarak akım-güç grafiği	45
Şekil 3.1. Harici optik salıncılı diyot lazer sisteminin iç yapısı.....	46
Şekil 3.2. Harici optik salıncılı diyot lazer sisteminin şematik gösterimi	49
Şekil 3.3. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarında tasarlanan lazer kafasının fotoğrafı.....	50
Şekil 3.4. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarında kullanılan montaj platformu	51
Şekil 3.5. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarında kurulan HOSDL sisteminde geri besleme elemanı olarak kullanılan saydam kırınım ızgarası	52
Şekil 3.6. Beyaz ışığın kırınım ızgarasıyla etkileşimi.....	53
Şekil 3.7. Kırınım ızgara çeşitleri	54
Şekil 3.8. Yansıtıcılı kırınım ızgarasının şeması.....	55
Şekil 3.9. Üzerine ışık düşen yansıtıcılı kırınım ızgarasının iç yapısı	56
Şekil 3.10. Saydam kırınım ızgarasının şematik gösterimi.....	57
Şekil 3.11. Saydam kırınım ızgarasına düşen ışıktan çıkan ışınların gösterimi.....	59
Şekil 3.12. SEM cihazında görüntülenen saydam kırınım ızgarası örneği	60
Şekil 3.13. Harici optik salıncılı diyot lazer sisteminde alınan ölçüm düzeneği	61
Şekil 3.14. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarında kurulan HOSDL sistemi ile frekans bant genişliği ölçümü alınan deney düzeneği.....	62
Şekil 3.15. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarında kurulan HOSDL sisteminde kullanılan Piezo güç kaynağı ile lazer kafasının akım ve sıcaklık kontrol cihazı.....	62
Şekil 3.16. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarında kurulan HOSDL sisteminde kullanılan optik bölüm	63
Şekil 3.17. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarında kurulan HOSDL sisteminde dalga boyu ölçümü için kullanılan fiber spektrometre cihazı	64
Şekil 3.18. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarında kurulan HOSDL sisteminde lazer ışığının gücünü ölçmek için kullanılan güç ölçer	64
Şekil 3.19. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarında kurulan HOSDL sisteminde Fabry Perot Etalonun bağlandığı osiloskop	65
Şekil 4.1. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarında kurulan HOSDL sisteminde osiloskop yardımıyla alınan frekans bant genişliğini gösteren fotoğraf	74
Şekil 5.1. HOSDL sistemiyle alınan bant genişliği ölçümü	75

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Işığın dalga özelliği ile parçacık özelliğinin karşılaştırılması	7
Tablo 2.2. Bazı lazerlerin eş evrel uzunlukları	11
Tablo 2.3. Katı hal lazerlerinin bazı özellikleri.....	32
Tablo 2.4. Bazı katı hallazerlerinin karakteristikleri.....	33
Tablo 3.1. Kurulan lazer sisteminde kullanılan aletler ve özellikleri	68
Tablo 3.1.'in devamı	69

1.GİRİŞ

İlk lazer General Electric ve IBM tarafından 1962’de çalıştırılmıştır. Ancak geniş yer kapladığından bu lazer pratik kullanıma uygun değildi. Daha sonra oda koşullarında çalışabilen diyot lazer, Bell firması tarafından 1970’lerde çalıştırılmıştır [1]. 1980’lerde de harici optik salıncılı diyot lazer konusunda çalışmalar yapılmıştır. Bu konudaki ilk makaleyi Fleming ve Moradian 1981 yılında yayınlanmıştır [2]. 80’li yılların sonunda ise harici optik salıncılı diyot lazer (HOSDL) sistemleri test ekipmanları arasında yerini almıştır [3].

HOSDL sisteminin en önemli özelliği dar bant genişliğinde ışınım yapabilmesidir [4]. Kırınım ızgaralı Littrow düzeneğindeki lazer 1972 yılında yayınlanmıştır.

Fizik araştırmaları artık ışık etkileşimi konusunda yoğunlaşmıştır. Işık kaynağı olarak lazer kullanımı yaygınlaşmıştır. Lazerler tek bir atomu belirleyebilecek tek renkliliğe ve odaklanmaya sahiptirler. Ancak dar bantlı ve çıkış frekansı ayarlanabilir olan lazerlerin maliyetleri çok fazladır.

Diyot lazerlerin gücü, yeni çalışmaları beraberinde getirmiştir. Amaca uygun olarak daha hassas hale getirilen bu lazerler, atomik düzeyde kullanılmaya başlanmıştır. Diyot lazerin sıcaklığa bağlı olarak ani frekans değişimi istenmeyen bir durumdur. Bunun için belirli kısıtlamalar ve düzenlemeler yapılarak kullanılması söz konusudur. Bu olumsuzlukları gidermek için geri beslemeli düzenek kullanmak gerekir. Bu, Littrow düzeneğinde görülebilir. Bu tür geri beslemeli sistemlere harici optik salıncılı diyot lazer sistemleri (HOSDL) denir. Bu sistemlerin üzerinde değişimler yapılarak, ışın kalitesi değiştirilmiştir. Özellikle frekans seçiciliği konusunda değişimler yapılmıştır. Bizim kullanacağımız HOSDL sisteminde frekans seçici olan saydam kırınım ızgarasıdır. Littrow düzeneğinde yapılan akortlamalarda, ışının sapmaya uğradığı gözlenmiştir. Bu durumda sistemde yeniden hassas ayarlama yapılması gerekir ve zaman kaybına neden olur [5].

Bu çalışmanın amacı:

- 1- Farklı tip saydam kırınım ızgarası kullanarak, 658 nm’de HOSDL sistemi kurulması,
- 2- Kurulan sistemde frekans bant genişliği ölçülmesidir.

2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. IŞIK KAYNAKLARI VE IŞIĞIN YAPISAL NİTELİKLERİ

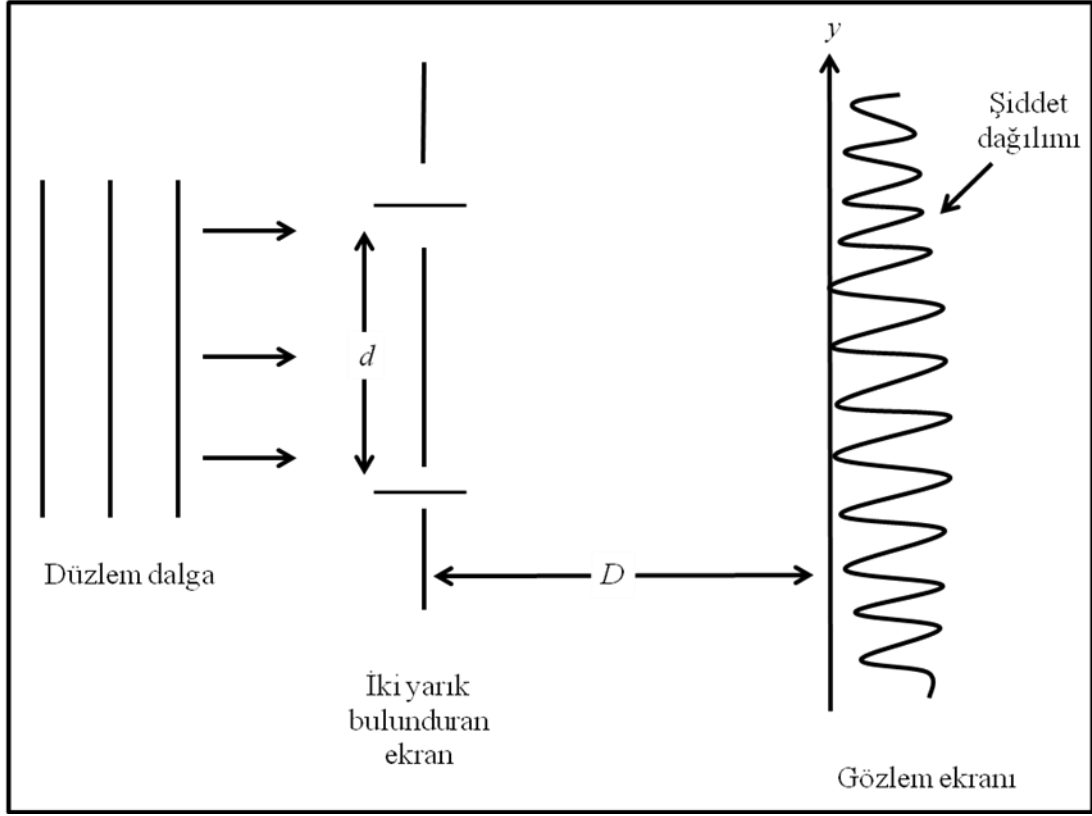
Işık, bir ışmanın ışık kaynağından çıktıktan sonra cisimlere çarpması ya da direk yansıması sonucu canlıların görmesini sağlayan yapıdır. Yunanca'da celeritas (hız) anlamına gelir ve “c” ile gösterilir.

17. yüzyılda ışık için iki teori geliştirilmiştir. Bunlardan birincisi, Hooke ve Huygens'in “dalga” teorisidir. Görünür ışık, insan gözü tarafından algılanabilen elektromanyetik dalgadır. İkincisi, Newton'un “parçacık” teorisidir. Dalga teorisi, girişim ve kırınım olaylarına açıklık getirmiştir ancak, ışığın yayılması, soğurulması ve fotoelektrik olayda hatalı sonuç vermiştir. 1905'te Einstein, enerjinin doğru orantılı olarak yayılmadığını, belli bölgelerde yoğunlaştığını ve parçacık gibi davranarak ilerlediğini öne sürmüştür. Bu parçacıklara Einstein “foton” adını vermiştir [6].

Tüm parçacıklar gibi fotonlarda dalga özelliği gösterirler. Yani dalga boyları ve frekansları vardır. Aslında ışık ışınları fotonların ilerlerken aldığı yoldur. Bu duruma ışığın çifte doğası da denilmektedir. Işık bazen dalga bazen de parçacık olarak yayılır. Enerji değişimi içeren deneylerde parçacık özelliği, girişim ve kırınım içeren deneylerde dalga özelliği gösterdiği söylenebilir.

Dalga Yapısı

Işığın dalga yapısı hemen kabul edilen bir teori olmadı. Bilinen ses dalgalarının ve su dalgalarının yayılmak için bir ortama ihtiyacı vardı. Aynı zamanda güneşten gelen ışınlar eğer dalga hareketi yapabiliyor olsaydı, bükülmeler olacaktı ve cisimlerin engellerine çarpınca, görülmeyen köşeler de rahatlıkla görülebiliyor olacaktı. Bahsedilen bu olay ışığın kırınımı olarak 1660'lı yıllarda Francesco Grimaldi tarafından bulundu. Grimaldi'nin deneysel verilerine inanmayan bilim adamları ışığın dalga yapısını reddetti. Francesco Grimaldi'nin çalışmalarına ek olarak 1678'de Christian Huygens, ışığın dalga teorisinin yansıma ve kırılma yasalarını açıklayabileceğini göstermiştir [7].



Şekil 2.1. Young'ın çift yarıқта girişim deneyi.

1801'de Thomas Young, ışığın girişim yaptığını göstererek, ışığın dalga modelini kanıtlamıştır. Şekil 2.1'deki Young dalga modeline göre; yarıklar tek renkli düzlem dalga ile aydınlatılmıştır. Yarıkların arkasına bir ekran konarak, buradan gözlem yapılmıştır. İki yarıktan geçen dalgalar, üst üste binerek Şekil 2.1'deki girişim desenini oluşturmuşlardır [8].

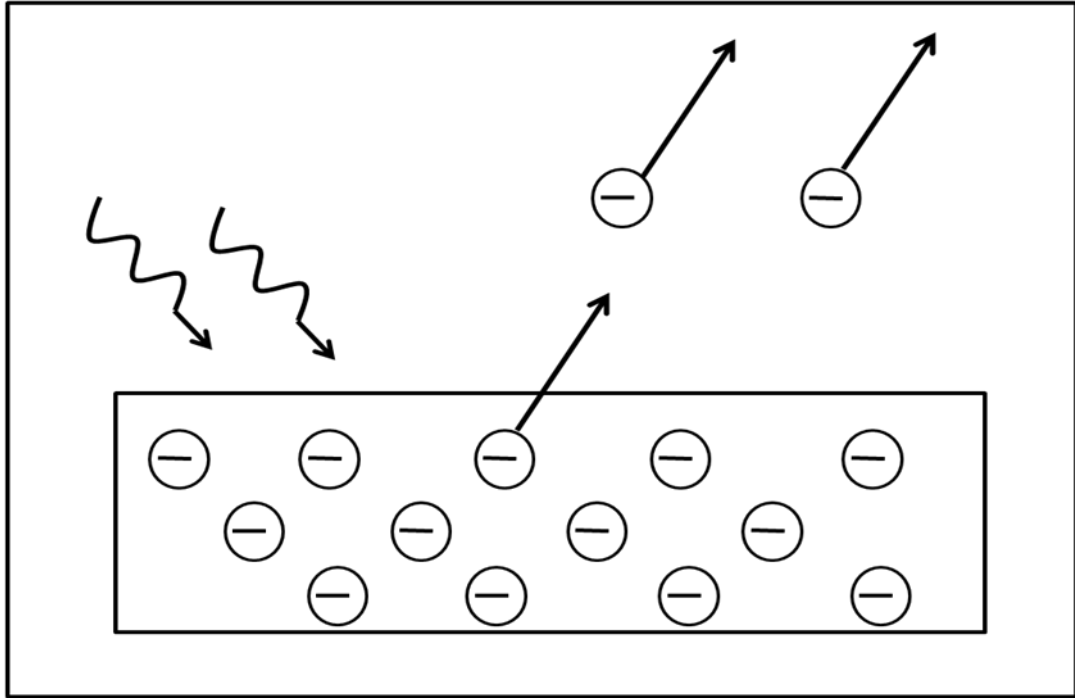
İki kaynak etrafındaki belirli noktalarda, ışık dalgaları yıkıcı girişimi ile birbirlerini söndürmüşlerdir. Işığın bu davranışı, parçacık teorisiyle açıklanamazdı. Çünkü iki veya daha fazla parçacığın üst üste gelip, birbirlerini yok etmeleri akla uygun değildi. Birkaç yıl sonra, Augustin Fresnel, girişim ve kırınım olaylarıyla ilgili ayrıntılı deney yapmıştır. 1850'de Jean Foucault, ışığın sıvılardaki hızının havadaki hızından daha az olduğunu göstererek, parçacık teorisinin yetersizliğini kanıtlamıştır [9].

19. yüzyıldaki gelişmeler, ışığın dalga teorisinin genel olarak kabul edilmesini sağlamıştır. 1873'te Maxwell, ışığın yüksek frekanslı elektromanyetik dalga biçiminde olduğunu iddia etmiştir. Işığı; elektrik ve manyetik alan

titreşimlerinden oluşan elektromanyetik dalga olarak kabul etmiştir. Elektrik ve manyetik alanda, ışığın sabit hızla hareket ettiğini bulmuştur. Hertz, 1887’de elektromanyetik dalgaları oluşturarak, Maxwell teorisinin deneysel ispatını yapmıştır [10].

Parçacık Yapısı

19. yüzyılın başlangıcından önce, ışığın bir ışık kaynağından yayılan parçacıklar akışı olduğu kabul edilmiştir. Bu parçacık teorisinin öncüsü Isaac Newton’dur. Parçacık modeline göre ışığın hızı; camlarda ve sıvılarda, havadakinden daha yüksek olmalıydı.



Şekil 2.2. Metal yüzeye düşürülen fotonların, elektron kopardığını gösteren Fotoelektrik olay.

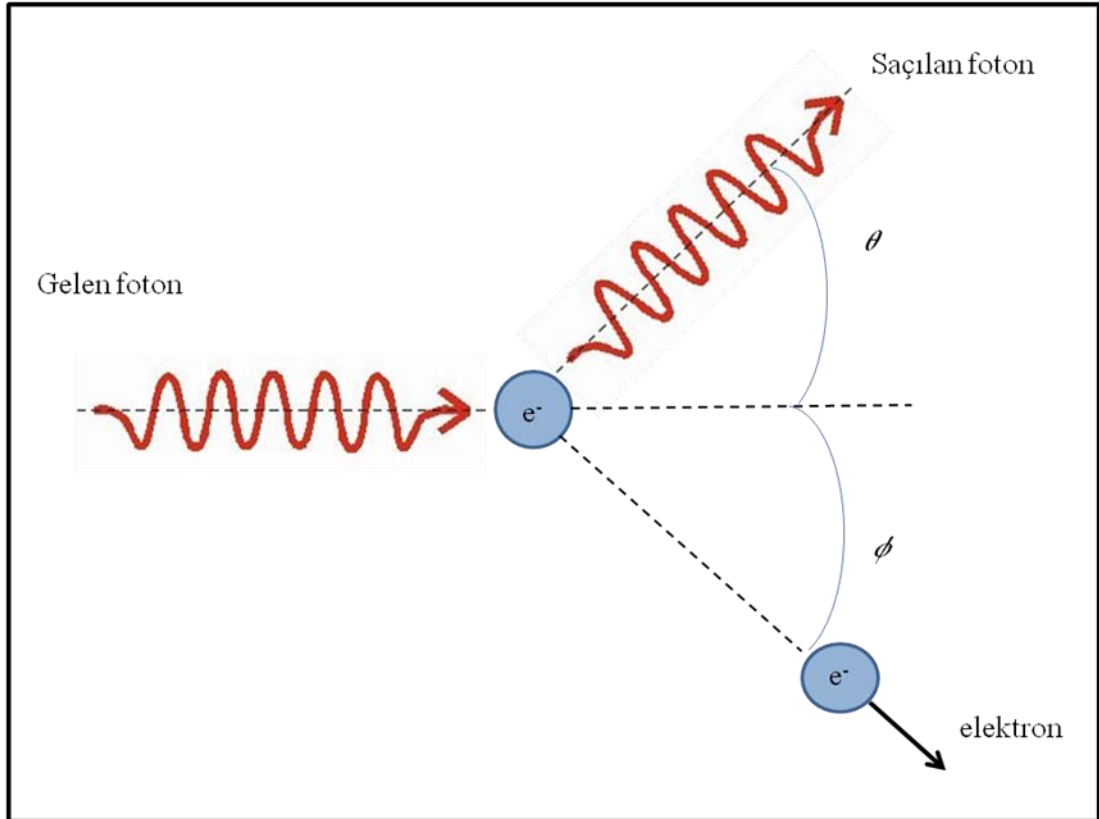
Fotoelektrik olay, ışığın parçacık yapısını kanıtlayan bir teodir. Şekil 2.2’de fotoelektrik olay gösterilmiştir. Bu teori; bir kaynaktan çıkan yüksek enerjili elektromanyetik dalganın metal bir yüzeye düşürülmesiyle, metaldeki elektronların serbest kalması olayıdır. Metal yüzeyden ayrılan bu elektronlara *fotoelektron* denir.

1900 yılında Max Planck, ışık ile enerji arasında bir bağ olduğunu iddia etmiştir. Fotoelektrik olayı göz önüne alarak, kara cisim ışımasını ortaya koymuştur.

Bu teoriye göre; eğer bir cisim üzerine düşen ışınları soğuruyorsa bu cisme kara cisim denir. Kara cisim, soğurduğu ışınları bir şekilde dışarıya vermek zorundadır. Farklı sıcaklıklarda, farklı dalga boylarında ışıma yapmaktadır. Bu kuramıyla Max Planck, kuantuma adım atmıştır. Işımanın ya da soğurulmanın belirli sıcaklıklarda yapılabileceğini ve bunun kuantum paketler halinde olabileceğini açıklamıştır. Kuantum paketleri, enerji dolu küçük fotonlar olarak izah etmiştir. Bu fotonların belirli enerjileri olduğunu savunarak, eşitlik 2.1'i ortaya çıkartmıştır.

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

Bu formülde; E , foton parçacıklarının enerjisi; h , Planck sabiti ve ν , frekanstır. Foton metal bir yüzeye çarptığında, $h\nu$ enerjisinin bir kısmı elektron sökmek için harcanmakta, bir kısmı da kinetik enerjiye (hareket enerjisi) harcanmaktadır. Bu teoriyi Compton olayı desteklemiştir [11].



Şekil 2.3. Compton saçılması.

Compton saçılmasına göre; ışık, bir elektrona Şekil 2.3'deki gibi çarpar. Çarpma sonucu, başlangıçta durgun olan elektron hareket kazanır ve belli yönde hareket etmeye başlar. Işık, çarpışmada enerjisinin bir kısmını kaybetmiştir ve daha az bir enerjiyle, farklı yönde yoluna devam eder.

Compton saçılmasında;

- Momentum korunur.
- Foton, çarpışma sonucu yok olmaz.
- Enerji korunur.

Yani;

$$E_{gelen\ foton} = E_{saçılan\ foton} + E_{elektron} \quad (2.2)$$

Fotoelektrik olay ile Compton saçılmasının farkı; Fotoelektrik olayda ışık, sökülen elektronlar tarafından soğurulur. Compton saçılmasında ışık, elektrona çarpar ve çarpışma sonrasında da vardır. Momentum korunumuna göre çalışır. Işığın hareketinin momentum korunumuyla anlatılabiliyor olması “ışık bir parçacıktır” görüşünü doğrulamaktadır.

Işığın dalga özelliği ile parçacık özelliğinin kıyaslanması Tablo 2.1'de verilmiştir.

Dalga özelliğinde; girişim ve kırınım olayları rahatlıkla gözlenir. Enerji, frekans ve momentum korunumu azdır. Fotoelektrik ve Compton olaylarının görülmesi güçleşir. Işığın dalga boyu artar.

Parçacık özelliğinde; Fotoelektrik ve Compton olayları rahatlıkla gözlenir. Enerji, frekans ve momentum korunumu fazladır. Kırınım ve girişim olayları gözlenemez.

Tablo 2.1. Işığın dalga özelliği ile parçacık özelliğinin karşılaştırılması.

Dalga özelliğinin artış yönü	Dalga boyu artış yönü	Frekans artış yönü	Parçacık özelliğinin artış yönü
<ul style="list-style-type: none">•EMD kızıl bölgeye kayar.•Dalga özelliği artar.•Frekans azalır.•Dalga boyu artar.•Enerji azalır.•Momentum azalır.•Kırınım olayının gözlenmesi kolaylaşır.•Girişim olayının gözlenmesi kolaylaşır.•Fotoelektrik olayın gözlenmesi zorlaşır.•Compton olayının gözlenmesi zorlaşır.•Fotonların tek tek gözlenmesi güçleşir.	→	←	<ul style="list-style-type: none">•EMD mavi bölgeye kayar.•Parçacık özelliği artar.•Frekans artar.•Dalga boyu azalır.•Enerji artar.•Momentum artar.•Kırınım olayının gözlenmesi zorlaşır.•Girişim olayının gözlenmesi zorlaşır.•Fotoelektrik olay gözlenir.•Compton olayı gözlenir.•Fotonlar tek tek gözlenebilir.

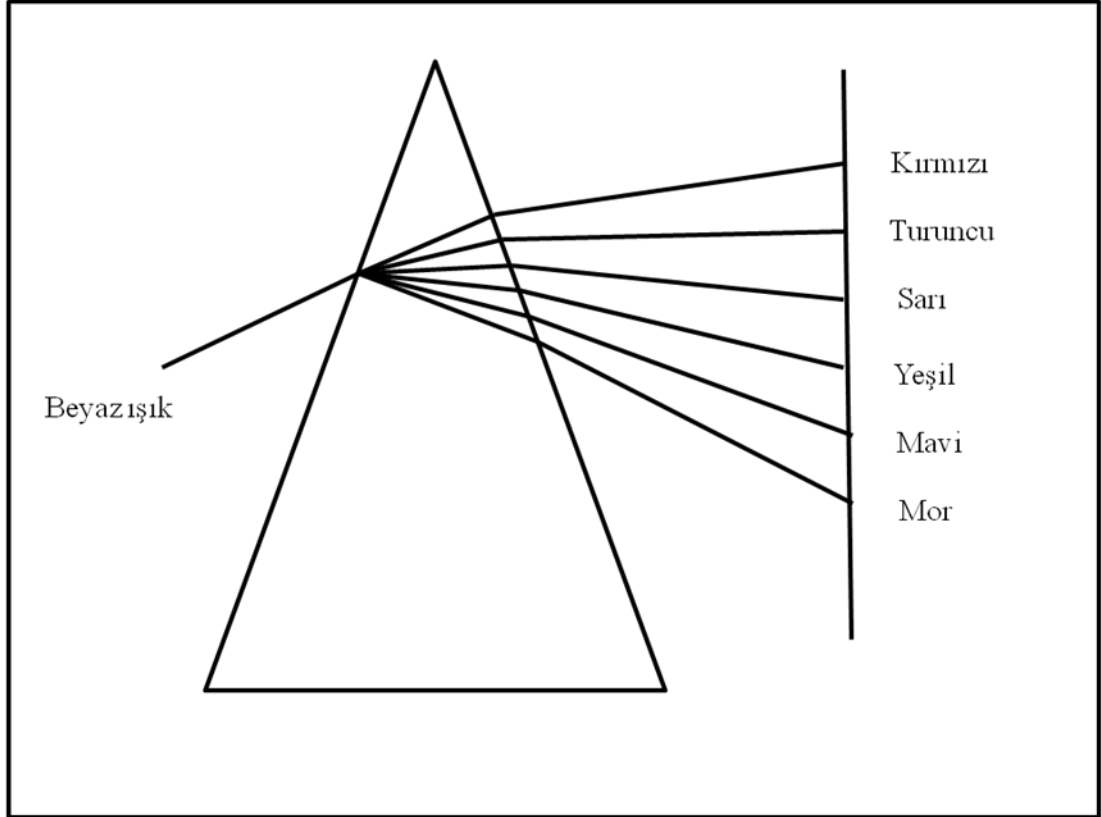
Enerji değişimi içeren deneylerde ışığın parçacık özelliği kullanılırken, girişim ve kırınım içeren deneylerde ışığın dalga özelliği kullanılabilir.

2.2. LAZER IŞIĞININ ÖZELLİKLERİ

Lazerin yaydığı ışık, diğer ışık kaynaklarından farklıdır. Diğer ışık kaynaklarından ayrılan en önemli özellikleri; tek renklilik, yönlenebilirlik, eş evreli olma ve uzaklaştıkça dağılmadır.

2.2.1. Tek Renklilik

Dalganın kendisini tekrarladığı uzaklığa dalga boyu denir ve “ λ ” ile gösterilir. Her ışığın dalga boyu vardır ve ışığın rengine göre dalga boyu değişim gösterir. Ayrıca her ışık kaynağı farklı dalga boylarında ışınlar üretir.

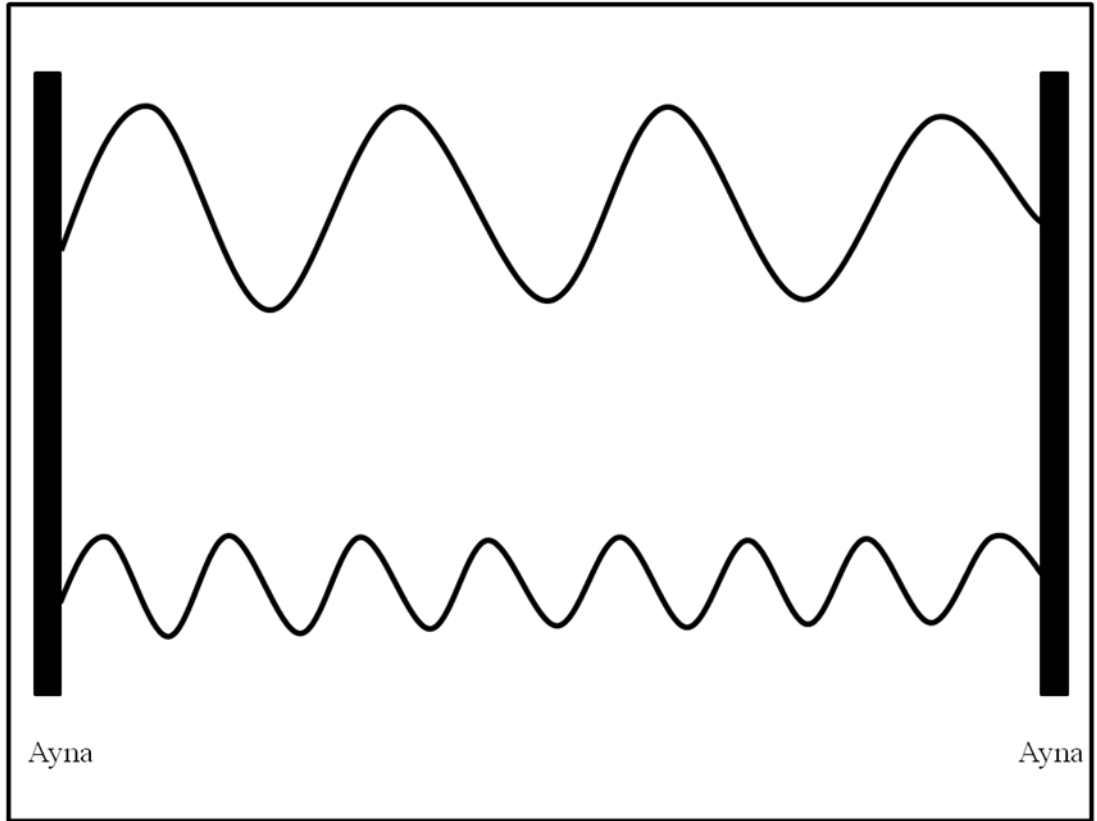


Şekil 2.4. Beyaz ışığın bir prizma yardımıyla renklerine ayrılması.

Bir ışık demetinin, geçirgen olmayan katı bir engelin kenarlarından bükülerek, başka doğrultulara sapmasına *kırınım* denir. Kırınım olayı her türlü dalgada (ışık, ses, su, radyo dalgaları gibi) görülebilir. Beyaz ışık kaynağı içerisinde birçok rengi barındırır. Şekil 2.4’de bu durum açıkça belirtilmiştir. Bir prizmaya

düşürülen beyaz ışık, kırılmalara uğrayarak, barındırdığı renklerine ayrılmıştır. Renklerdeki bu sıralama, dalga boyuna göredir. En büyük dalga boyuna sahip olan renk; kırmızı iken, en küçük dalga boyuna sahip olan renk; mordur [12].

Tek renklilik, ışığın tek bir dalga boyuyla tek bir frekansa sahip olması demektir. Bant genişliği oldukça dar, aralarında açısız bir fark olmadan ilerleyen ışın demetine *tek renkli* denir. Gerçekte tek renkli ışık üretmek oldukça zordur. Bazı iyileştirmeler yapılarak, tek renklilik elde edilebilir. Tek renkli ışığa en yakın ışığı lazer ışık kaynağı üretir. Lazer ışığının dalga boyu çok dardır. Lazer ışık kaynağı da belirli dalga boyuna sahip ışın demeti üretir. Bu tip ışık çok özel bir yolla elde edildiği için frekans aralığı da oldukça sınırlıdır [13].



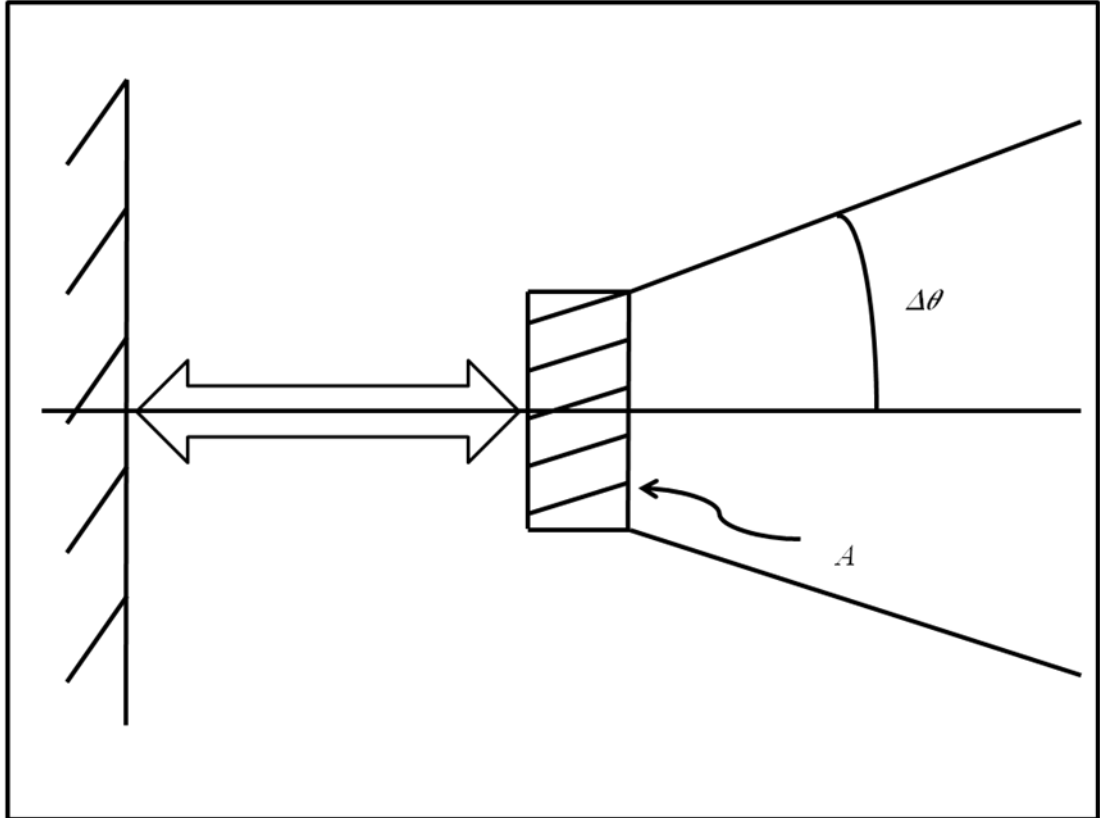
Şekil 2.5. Lazer kovuğu içerisinde oluşan farklı frekanslı iki ışığın kıyaslanması.

Lazerler, genellikle farklı frekanslı birkaç ışını aynı anda oluştururlar. Bu frekansların sayısı; salıncının şekline ve lazer ortamına bağlı olarak değişir. Şekil 2.5'te aynı anda üretilen, fakat farklı frekanslara sahip iki dalga gösterilmiştir. Bu

oluşuma *boylamsal mod* denir. Özel lazerler üretilirken; istenilen frekans aralığı, bu modlardan birine kilitlenir. Böylece belirli bir frekansı olan, tek renkliliğe en yakın özel lazerler elde edilmiş olur.

2.2.2. Yönlendirilebilirlik

Günlük hayatta kullanılan ışık kaynakları her yöne ışık yaymaktadır. Yönlendirilebilirlik; lazer ışığının karakteristik özelliklerinden biridir ve lazer ışığının bir yönde dar bir alanda yayılımı demektir. Işık kaynağından çıkan ışığın paralel olması, ışığın bir araya gelmesini sağlamaktadır. Lazer ışını, uzun mesafeleri sabit genişlikte ve ışın demeti olarak alır. Belirli uzaklıktan sonra genişlemeye başlar [14].



Şekil 2.6. Lazer salıncısından geçen ışın.

Yönlenebilirlikte açısal dağılım önemlidir. Şekil 2.6’da lazer salınıcısından çıkan ışının $\Delta\theta$ açısal genişlemesiyle dağılımı gösterilmiştir. Lazerden çıkan λ dalga boylu ışığın katı açısı formülü, eşitlik 2.3’deki gibi verilir.

$$\Delta\Omega \approx \frac{\lambda^2}{A} \approx (\Delta\theta)^2 \quad (2.3)$$

Burada; $\Delta\Omega$, katı açısı; A, lazer çıkış ucunun alanı; λ , ışığın dalga boyu; $\Delta\theta$, açısal demet genişlemesidir.

2.2.3. Eş Evreli Olma

Işık dalgalarının frekans, faz ve doğrultularının aynı olmasına *eş evreli olma* denir. Eş evreli ışık dalgalarının belirli genlikleri ve dalga boyları vardır [15].

Tablo 2.2. Bazı lazerlerin eş evrel uzunlukları.

Lazer Tipi	Eş Evrel Uzunluğu (m)
He-Ne Tek modlu	<1000
He-Ne Çok modlu	0.1-0.2
Argon çok modlu	0.02
Nd:YAG	1×10^{-2}
Nd:Cam	2×10^{-4}
GaAs	1×10^{-3}
Yakut	1×10^{-2}

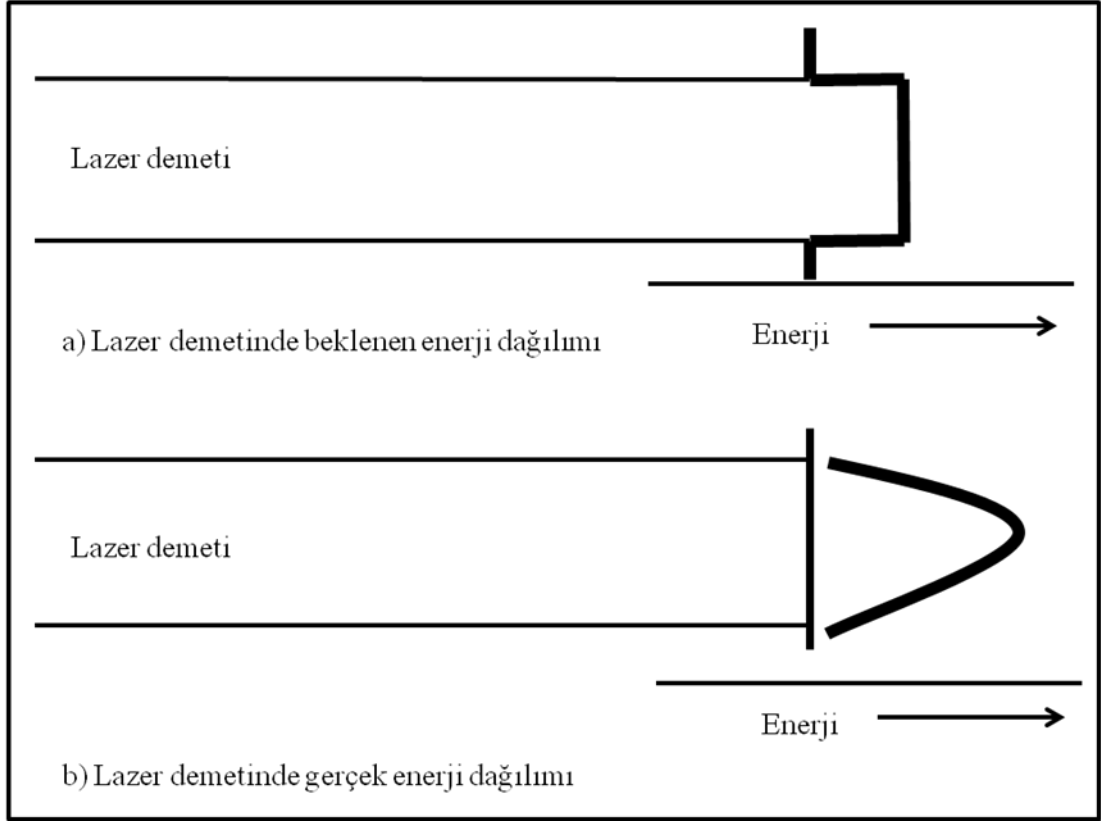
Uyumlu olan dalgaların her biri sinüzoidaldir. Lazer ortamında dışarıya çıkan bu sinüzoidal dalgaların maksimum genliği ve dalga uzunluğu sabit kalmaktadır. Örneğin; lazer ortamında dışarıya çıkan dalgalardan biri durdurulduğunda tepe noktasındaysa, diğer dalga da tepe noktasında olmalıdır. Bu tutarlılığın bir diğer adı da *zamansal uyumluluk* olarak bilinir [16].

Faz; tek frekanslı dalğanın görüntüsü demektir. Girişim deseni oluşturan aynı frekanslı iki ışık kaynağı aynı anda dalga üretmezse aralarında faz farkı oluşur. Aynı frekansa ve periyoda sahip iki dalgayı ele aldığımızda; iki dalga arasındaki açı sıfır ise bu dalgalar aynı fazlıdır. Eğer bu iki dalga arasındaki açı 180° ise bu dalgalar zıt fazlıdır.

Bir ışık kaynağının şiddeti, bir yüzeye birim zamanda ulaştırdığı enerjiye bağlıdır. Aynı noktaya gelen dalgalar eğer aynı fazlarda ise, birbirlerini kuvvetlendirirler. Zıt fazda olurlarsa birbirlerini zayıflatırlar. Lazer kaynağı hariç diğer ışık kaynakları aynı fazda ışık yayamadıklarından, lazerlere göre çok zayıflardır [17].

2.2.4. Uzaklaştıkça Dağılma

Lazer kaynağından çıkan ışınlar neredeyse paralel bir demet şeklindedir ve geniş bölgeye yayılmazlar. Ancak bu paralel demette az da olsa bir eğilme söz konusudur. Bu eğilmeye *difraksiyon* denir [18].



Şekil 2.7. Lazer ışınında; a) Beklenen enerji dağılımı, b) Gerçek enerji dağılımı.

Her ışık kaynağının ürettiği ışık demeti dağılmaya meyillidir. Lazer demetinin dağılma açısı genellikle mili radyan cinsinden ölçülür. Şekil 2.7.a'da gösterildiği gibi; lazer demetinde beklenen enerji dağılımı düzgün bir dağılımdır. Ancak; oluşan dağılım Şekil 2.7.b'deki gibidir. Merkezde enerji çok fazladır, fakat kenarlara gidildikçe enerji azalmaktadır.

Lazer demeti mercek kullanılarak leke şeklinde odaklandırılabilir. Dış bükey mercek kullanarak demet çapı daraltılabilir, iç bükey mercek kullanılarak demet çapı genişletilebilir.

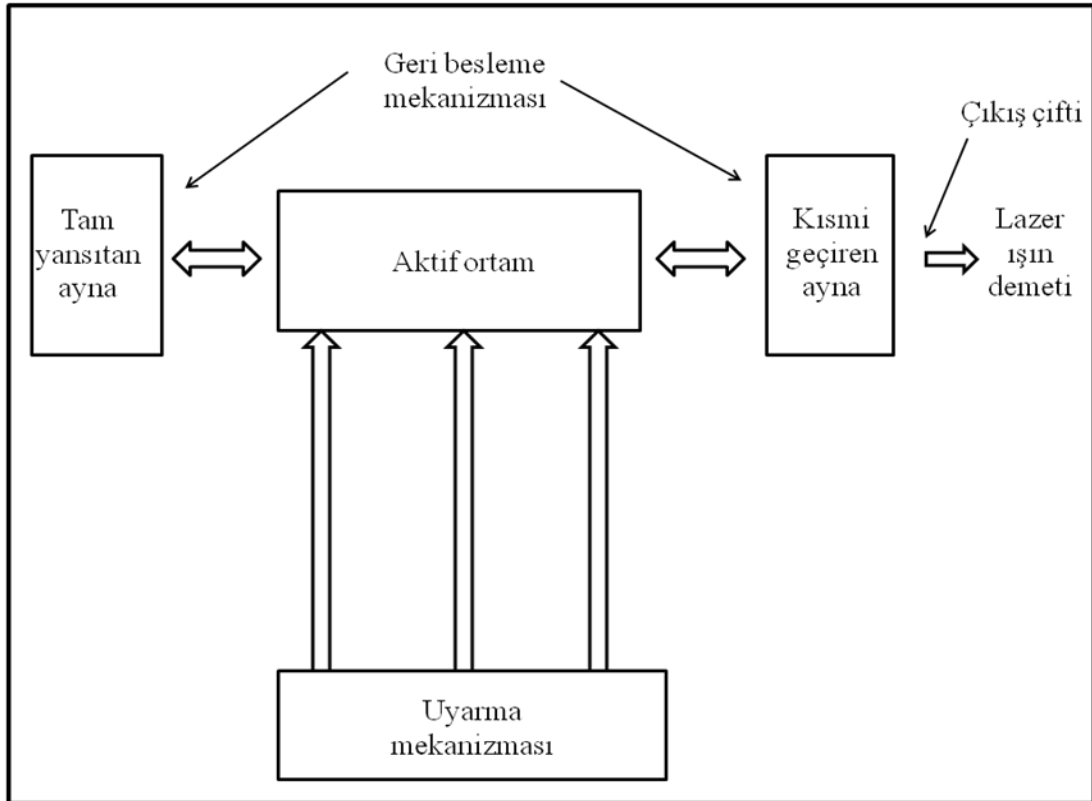
2.3. LAZER İŞLEMİ

Dalga frekansı mikrodalga bölgesine düşen yükselticilere MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) denir. Dalga frekansı görme bölgesine düşen yükselticilere LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) denir. Lazer kelimesi ‘ Işığın Uyarılmış Salınım Yoluyla Şiddetlendirilmesi’ anlamına gelmektedir [19].

Yükselticilerde salınım elde etmek için pozitif geri besleme bölümünün olması gerekir. MASER de bu işlem optik çukur kullanılarak yapılırken, LASER de aktif materyalin iki ucuna yerleştirilen yansıtıcı aynalar ile sağlanmıştır.

Lazer işleminden ışın demeti elde etmek için;

- * Sistemde nüfus tersinmesi olmalıdır.
- * Sistemin uyarılmış durumu yarı kararlı olmalıdır.
- * Yayılan fotonlar, uyarılmış atomlardan uyarılmış ışıma yaptırmaya yetecek kadar uzun süre sistem içerisinde bulunmalıdır.

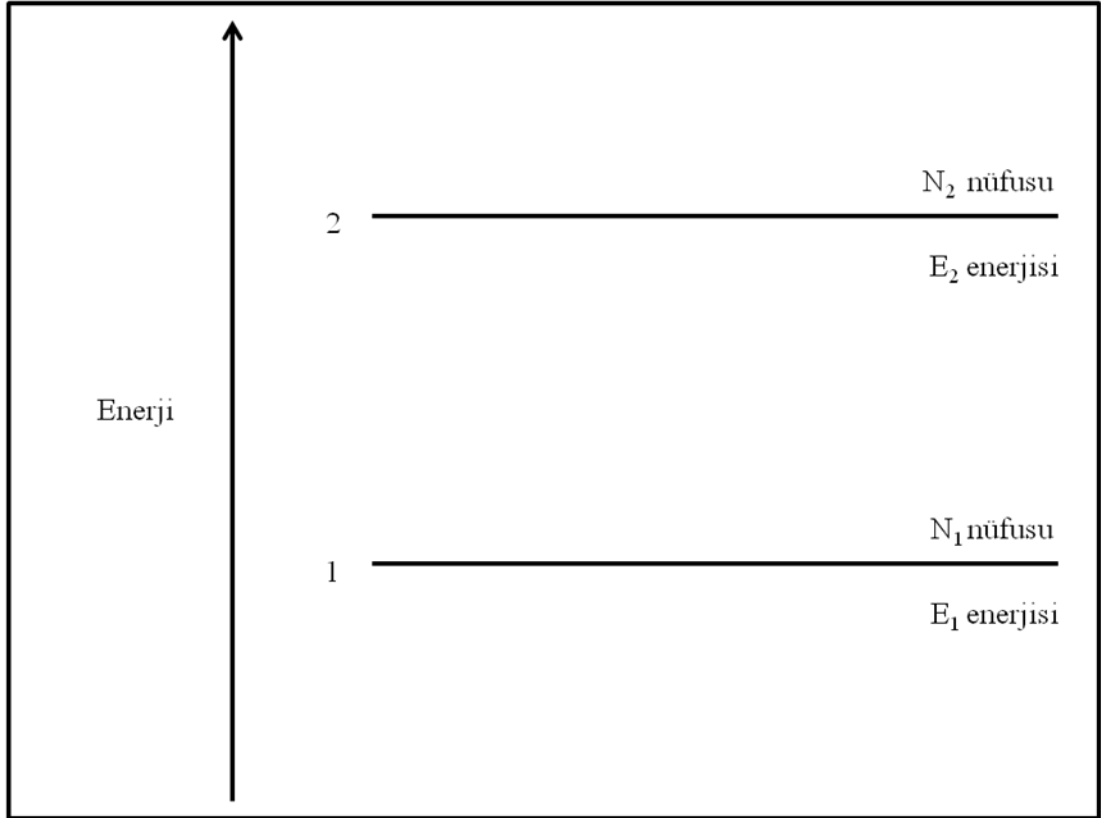


Şekil 2.8. Lazeri oluşturan temel elemanlar.

Lazeri oluşturan temel elemanlar Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Bu elemanlar; uyarma mekanizması, aktif ortam, tam yansıtıcı ayna ve kısmi geçiren aynadır. Aynalar, sistemin geri besleme mekanizmasını olarak kullanılmaktadır.

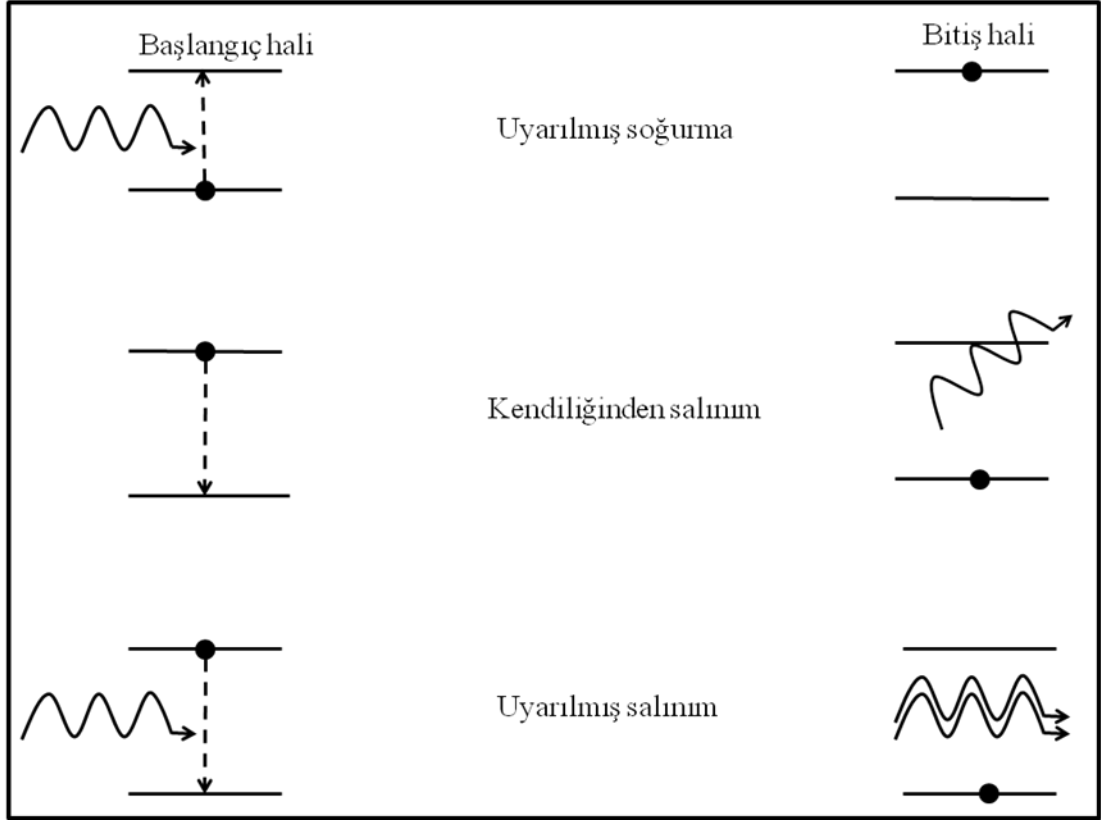
2.3.1. Atomların Uyarılması

Atomdaki bir elektron iki enerji seviyesi arasında geçiş yaparsa, foton yayar ya da foton soğurur. Şekil 2.9’da iki enerji seviyesi arasındaki geçiş gösterilmiştir.



Şekil 2.9. İki enerji seviyeli sistem.

Elektron E_1 enerji seviyesindeyse, foton soğurarak E_2 üst seviyesine geçebilir. Ayrıca E_2 seviyesindeki bir elektron, foton salarak bir alt seviyeye inebilir. Salınım iki şekilde gerçekleştirilir. Bunlardan biri kendiliğinden salınımdır. İkinci enerji seviyesindeki atomun foton salarak, birinci enerji seviyesine geçmesine kendiliğinden salınım denir. Diğerisi ise uyarılmış salınımdır. İkinci enerji seviyesindeki atomun, bir foton yardımıyla uyarılarak, birinci enerji seviyesine geçmesi ve aynı zamanda geçiş yaparken foton salması olayına uyarılmış salınım denir.



Şekil 2.10. Uyarılmış soğurma, kendiliğinden salınım ve uyarılmış salınım enerji seviyeleri diyagramı.

Kendiliğinden salınım yapan atom, uyarılmış salınım yapan atom ve uyarılmış soğurma yapan atom Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Kendiliğinden salınım yapan atom, gelişigüzel salınım yapacağından, ahenkli dalga üretmez. Ancak uyarılmış salınım yapan atom, aynı frekanslı dalga üreteceğinden, ahenkli dalga üretir [20].

Lazer ışık kaynağının oluşması için iki temel özelliğe ihtiyaç vardır. Bunlardan biri, atomların aktif ortamda kendiliğinden salınım yapabilmesidir. İkincisi ise, uyarılmış atomların sayısının foton salarak taban durumuna geçmiş atomların sayısından fazla olması gerekir. Böylece aktif ortamın bir ucundan giren ışın demeti uyarılmış salınımdan dolayı daha da yoğunlaşmış olarak aktif ortamın diğer ucundan çıkar. Bu durum optik kazanç sağlar [21].

2.3.2. Einstein Bağlılıkları

Einstein soğurma, kendiliğinden salınım ve uyarılmış salınım olaylarında birinci enerji seviyesinden ikinci enerji seviyesine geçişin (E_1 'den E_2 'ye), ikinci enerji seviyesinden birinci enerji seviyesine olan geçişe (E_2 'den E_1 'e) eşit olması gerektiğini Einstein Bağlılıkları ile açıklamıştır [22].

ν frekansındaki enerji yoğunluğu eşitlik 2.4'deki gibi verilir.

$$\rho_\nu = N h \nu \quad (2.4)$$

Burada; N , ν frekansına sahip foton sayısı; ρ_ν , enerji yoğunluğu; h , Planck sabitidir.

Fotonun birinci enerji seviyesinden ikinci enerji seviyesine geçiş oranı eşitlik 2.5'deki gibi verilir.

$$N_1 \rho_\nu B_{12} \quad (2.5)$$

Burada; B_{12} , fotonun birinci enerji seviyesinden ikinci enerji seviyesine çıktığını gösteren Einstein sabitidir.

Fotonun ikinci enerji seviyesinden birinci enerji seviyesine geçiş oranı eşitlik 2.6'daki gibi verilir.

$$N_2 \rho_\nu B_{21} \quad (2.6)$$

Burada B_{21} , fotonun ikinci enerji seviyesinden birinci enerji seviyesine geçişini gösteren Einstein sabitidir.

İkinci enerji seviyesinden birinci enerji seviyesine yapılan kendiliğinden salınım eşitlik 2.7'deki gibi verilir.

$$N_2 A_{21} \quad (2.7)$$

Burada; A_{21} , Einstein sabitidir.

Toplam salınım oranı eşitlik 2.8'deki gibi verilir.

$$N_2 \rho_\nu B_{21} + N_2 A_{21} \quad (2.8)$$

Salınım oranının soğurma oranına eşit olduğunu gösteren denklem eşitlik 2.9'daki gibi verilir.

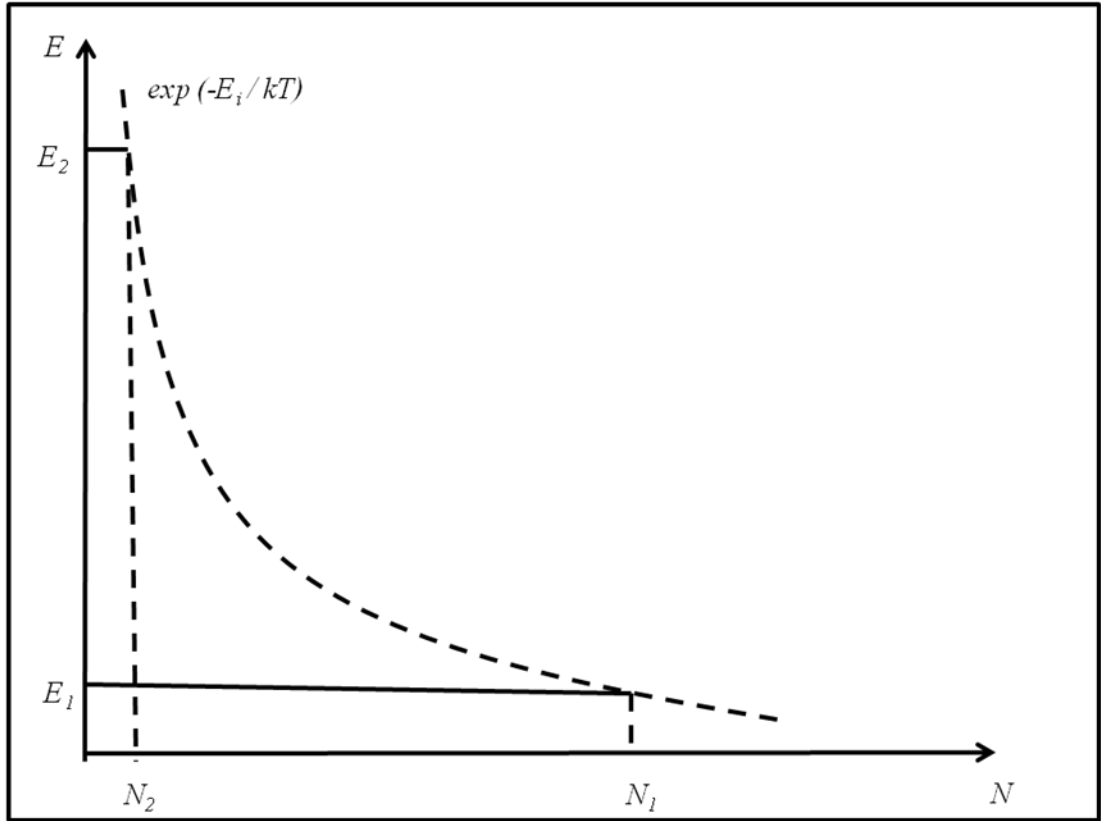
$$N_1 \rho_v B_{12} = N_2 \rho_v B_{21} + N_2 A_{21} \quad (2.9)$$

ρ_v enerji yoğunluğunu yalnız bırakırsak;

$$\rho_v = \frac{A_{21}/B_{21}}{\frac{B_{12}N_1}{B_{21}N_2} - 1} \quad (2.10)$$

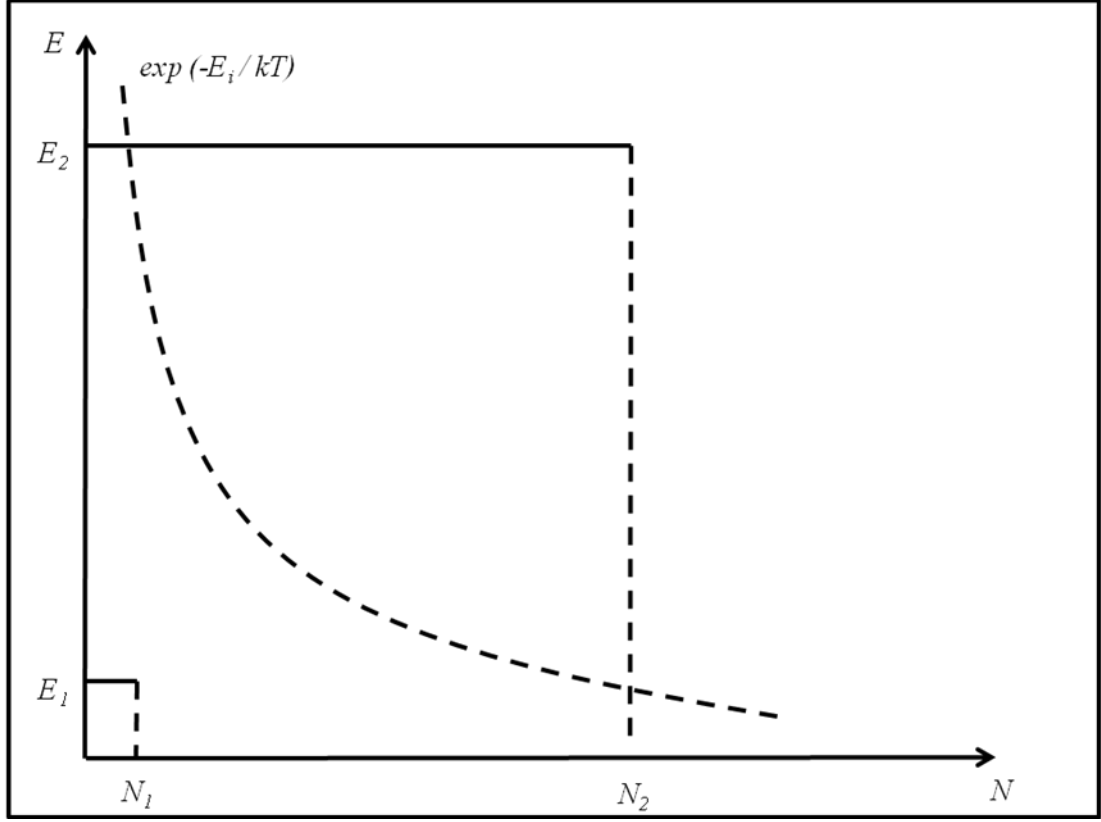
2.3.3. Nüfus Tersinmesi

Lazer ortamındaki elektronlar enerji uyumuna göre kendilerine uygun fotonun enerjisini alarak, bir üst seviyeye geçerler [24].



Şekil 2.11. İki enerjili sistemin ısı dengedeki nüfus durumu.

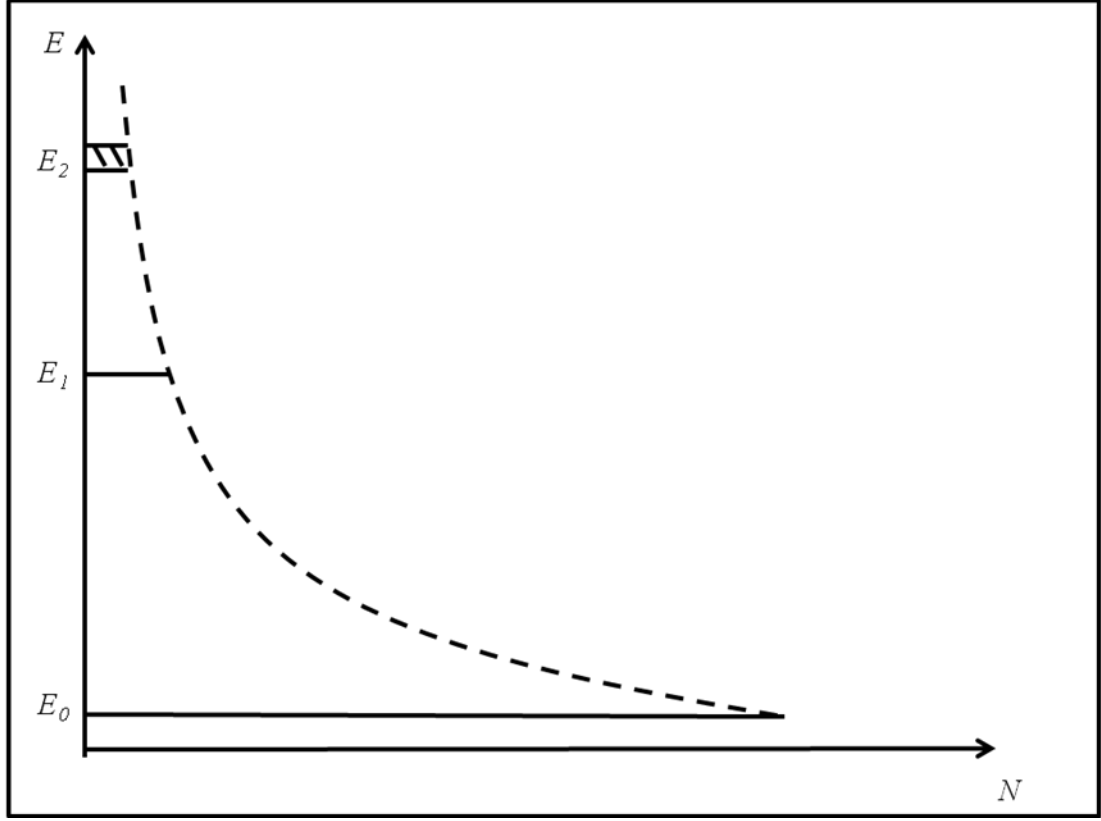
Isıl dengedeki bir sisteme Boltzman denklemi uyarlanırsa Şekil 2.11 elde edilir. Burada; E_1 enerji seviyesindeki nüfus durumu, E_2 enerji seviyesindeki nüfus durumundan daha fazladır. İki nüfus yoğunluğu arasında büyük bir fark vardır.



Şekil 2.12. İki enerji seviyeli sistemin nüfus tersinmesi sonrası nüfusu.

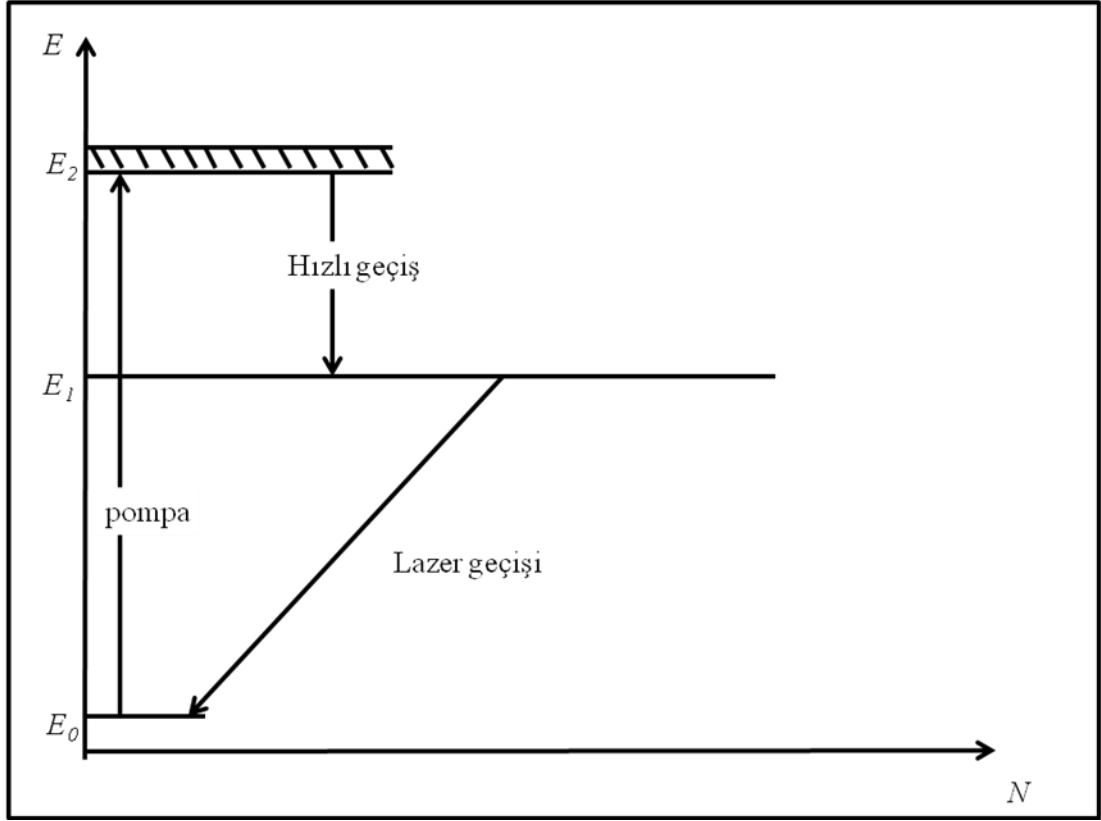
Lazere fazla enerji verilip, nüfus tersinmesi sağlanması olayına *pompalama işlemi* denir. Şekil 2.12'de iki enerjili sistemin pompalama sonucu oluşturduğu nüfus tersinmesi gösterilmiştir. E_1 enerji seviyeli sistemin nüfusu N_1 daha küçükken, E_2 enerji seviyeli sistemin nüfusu N_2 daha büyüktür. Pompalama sonucu N_2 nüfusu artmıştır ve lazer için gerekli nüfus tersinmesi sağlanmış olur.

Pompalama işlemlerinden biri uyarılmış soğurmadır. Burada enerji seviyeleri, sistemin aşırı aydınlatılması ile pompalanır.



Şekil 2.13. Üç enerji seviyeli sistemde pompalama olmadan önceki Boltzmann dağılımı.

Aynı işlem üç enerji seviyeli lazer sistemlerinde de gösterilebilir. Şekil 2.13'de üç enerjili lazer sisteminin pompalama olmadan önceki durumu gösterilmiştir. Burada; nüfusun en fazla olduğu yer E_0 enerji seviyesindedir. E_1 ve E_2 enerji seviyelerine çıktıkça nüfus azalmaktadır. Pompalama işlemi olmadığı için, bu durum beklenen bir olaydır.



Şekil 2.14. Üç enerji seviyeli sistemde pompalama olduktan sonraki Boltzmann dağılımı içeren geçişler.

Üç enerjili lazer sisteminde pompalama sonucu oluşan nüfus tersinmesi Şekil 2.14’de gösterilmiştir.

Atom grubu şiddetli bir şekilde aydınlatılırsa, elektronlar E_0 ’dan E_2 ’ye pompalanabilirler. E_2 enerji seviyesinden E_1 enerji seviyesine ışık salmadan düşerler ve E_1 ile E_0 arasında nüfus tersinmesi gerçekleşir.

E_2 ile E_1 arasındaki geçiş hızlı olmalıdır. Çünkü yeni uyarımlar için boşluklara ihtiyaç vardır. E_1 ile E_0 arasındaki geçiş ise çok yavaş olmalıdır. Böylelikle E_1 enerji seviyesi yarı kararlı durumda kalır.

2.3.4. Optik Geri Besleme

Lazer bir titreştiriciye benzer. Bir titreştiricide pozitif geri besleme sağlanarak, özel bir frekansa ayarlama yapılır. Şiddetlendirilmiş çıkış ışını, girişle tekrar beslenir ve böylece kuvvetlendirilmiş olur.

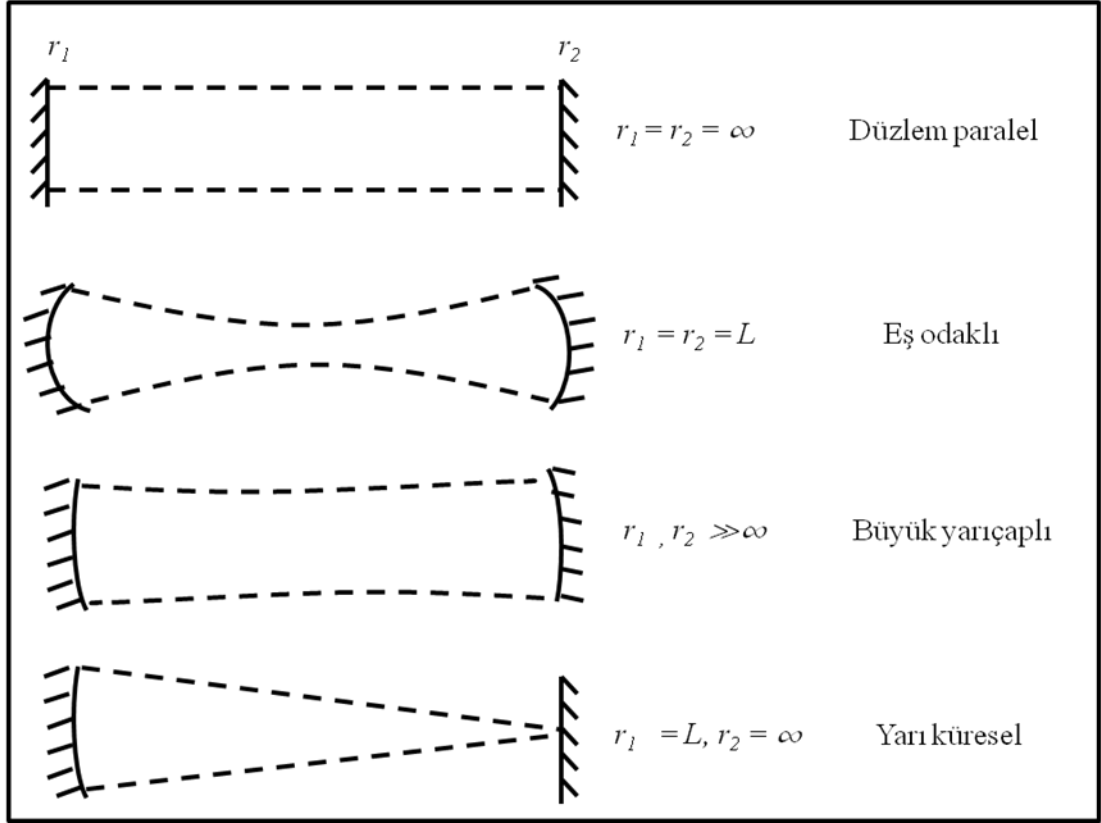
Lazerde geri besleme optik salıncılarla sağlanır. Salıncı; iki ayna arasında konulan kazanç ortamı ile elde edilir. Başlangıç ivmelenmesi; enerji seviyeleri arasında gerçekleşen kendiliğinden salınımla sağlanır. Sinyal ortam boyunca yükseltilir ve aynalar aracılığıyla geri beslenir. Ortamda sağlanan kazanç, tam döngü bitiminde kayıplarla eşitlendiği zaman tam doyuma ulaşılır [25].

Salıncı içindeki ışığın bir demet halinde, birbirine paralel iki ayna arasında ileri geri gittiğini varsayalım. Aynalardaki kırınım ve soğurma olayları, ışın demetinde kayıplara yol açmaktadır.

Aynalardaki kırınım sebebiyle, ışık demetinde süreklilik sağlanamaz. Kırınımdan kaynaklı bu kayıplar, dışbükey aynalarla düzeltilir. Bu tip salıncılara *kararsız salıncı* denir. Kayıp oranları fazladır ancak mod hacmini verimli bir şekilde kullanırlar. Lazer ışığından çıkan elektromanyetik dalgaların sıkıştığı bölgeye *mod hacmi* denir.

Aynalardaki soğurmalar kayıplara neden olur. Bu kayıpları önlemek içinde, yansıtma özelliği fazla olan kaplamalar aynaların yüzeyine kaplanır. Böylece aynalarda soğurmalar kayıplara en aza indirilmiş olur.

Aynalardaki kayıp oranları azaltıldığında, geri besleme mekanizmasının verimi de artar. Kayıp oranıyla kazanç oranı eşitlendiğinde ışın demeti doyuma ulaşır. Daha verimli ve daha şiddetli bir lazer ışığı elde edilmiş olur.



Şekil 2.15. Lazerlerde kullanılan salıncıcı ayna çeşitleri.

Şekil 2.15’de gösterilen salıncıcı ayna çeşitleri gösterilmiştir. Burada; L , iki ayna arası uzaklıktır. Her bir aynanın kendine özel olumlu ve olumsuz özellikleri bulunmaktadır. Örneğin; düzlem paralel aynalarda, bu iki aynanın tam anlamıyla paralel olarak ayarlanması oldukça güçtür. Eş odaklı aynalarda, odakların eşitlenmesi oldukça zordur. Büyük yarıçaplı aynaları bir arada tutmak çok güçtür. Yarı küresel aynalarda, küresel aynayı, düzlem aynayla birlikte ayarlamak çok zordur. Bunun yanında; eş odaklı aynalardan sağlanan verim fazladır. Çünkü ayna yarıçapları ile aynalar arası uzaklık birbirine eşit olduğundan, orantılı bir lazer kovuğu elde edilir. Lazer kovuğu orantılı olduğu zaman, geri besleme mekanizması çok yüksek verimle çalışır. Şiddetli ve sürekli beslenebilen bir lazer ışığı elde edilir.

2.3.5. Lazer Kipleri

Lazer oldukça dar bantlı spektral çizgilerden oluşur. Bu çizgilerin her biri farklı frekanslara sahiptir. Bu dar bantlı çizgilerin oluşumu ve salıncıcı içindeki

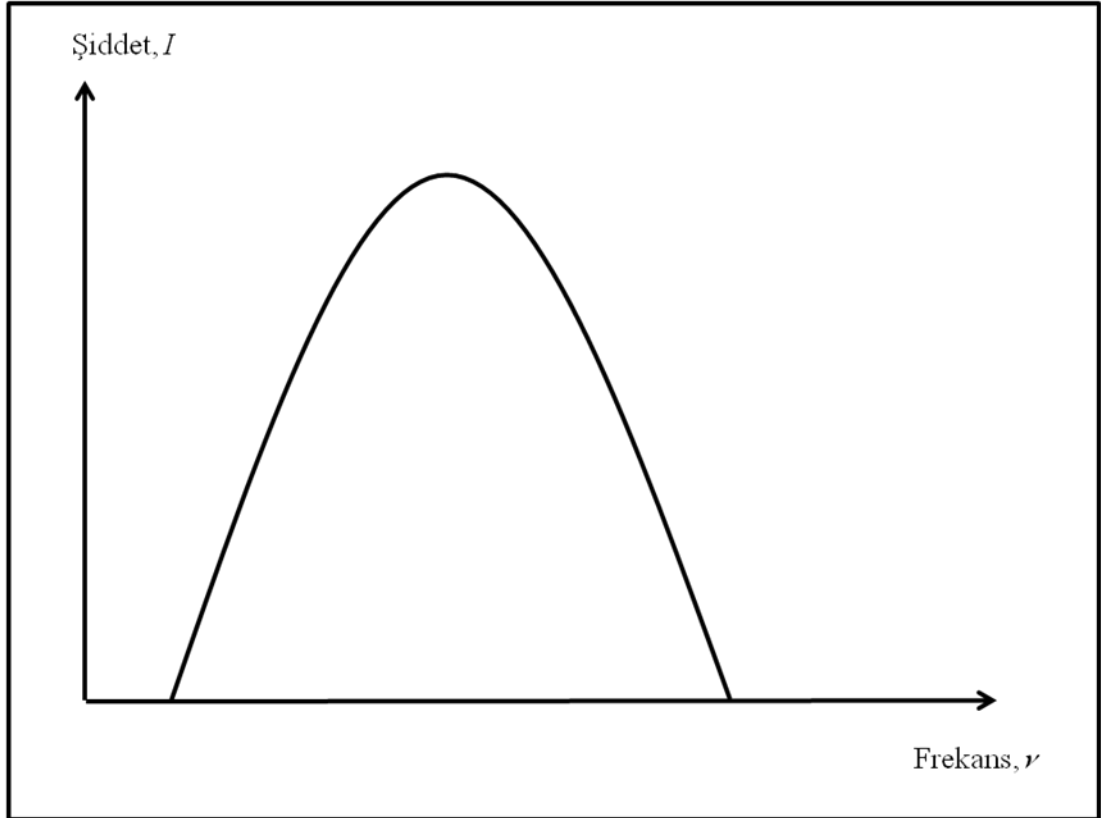
aynaların enerji geçişlerine nasıl etki ettiği aksenel ve enine modlara bakılarak açıklanmıştır [26].

2.3.5.1. Aksenel modlar

Lazerin içerisinde iki ayna vardır. Bu iki ayna arasındaki boşluğa *rezonant boşluk* denir. Bu boşluk eşitlik 2.11'deki gibi verilir.

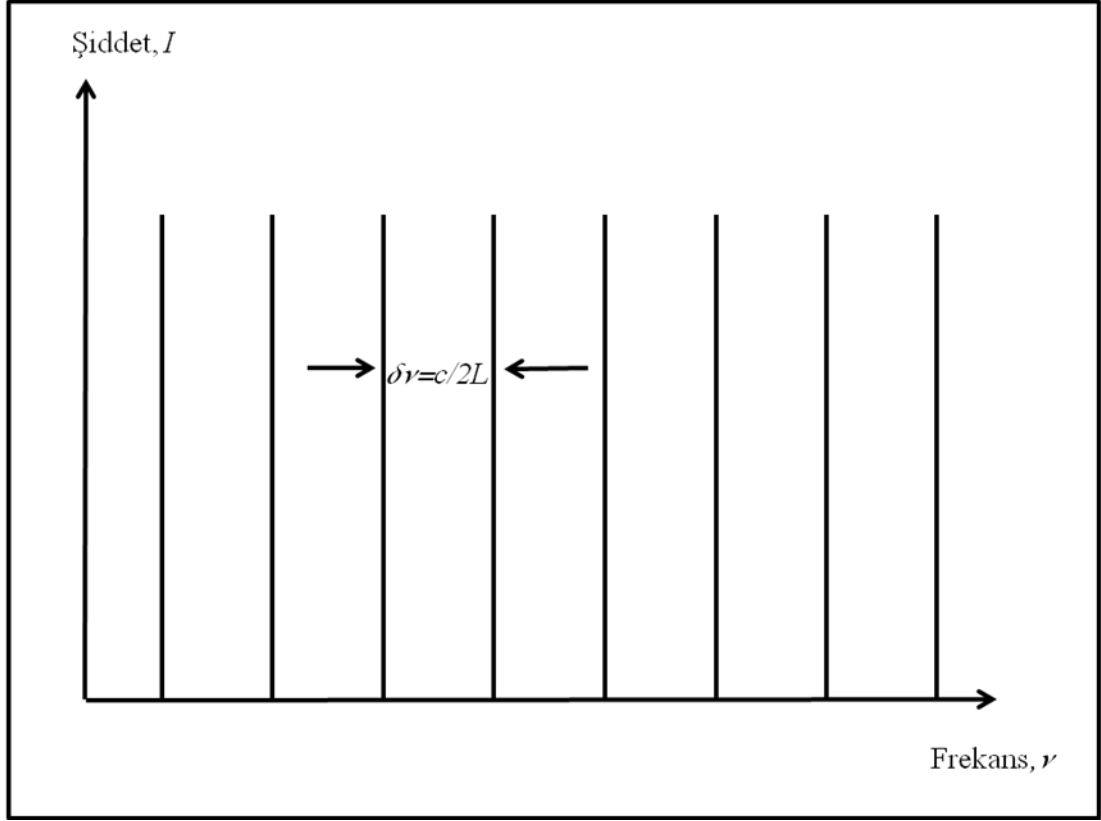
$$L = p \frac{\lambda}{2} \quad (2.11)$$

Burada; p , bir tam sayı; λ , dalga boyu; L , lazer içerisindeki iki aynanın arası boşluktur.



Şekil 2.16. Lazerin içerisindeki geçiş çizgilerinin genişletilmiş hali.

Lazerin içerisindeki modların bulunduğu alan Şekil 2.16'daki gibi genişletilmiştir. Lazer işleminde çıkan ışığın modlarından birini seçmek için genişletilmiş hali kolaylık sağlamaktadır.

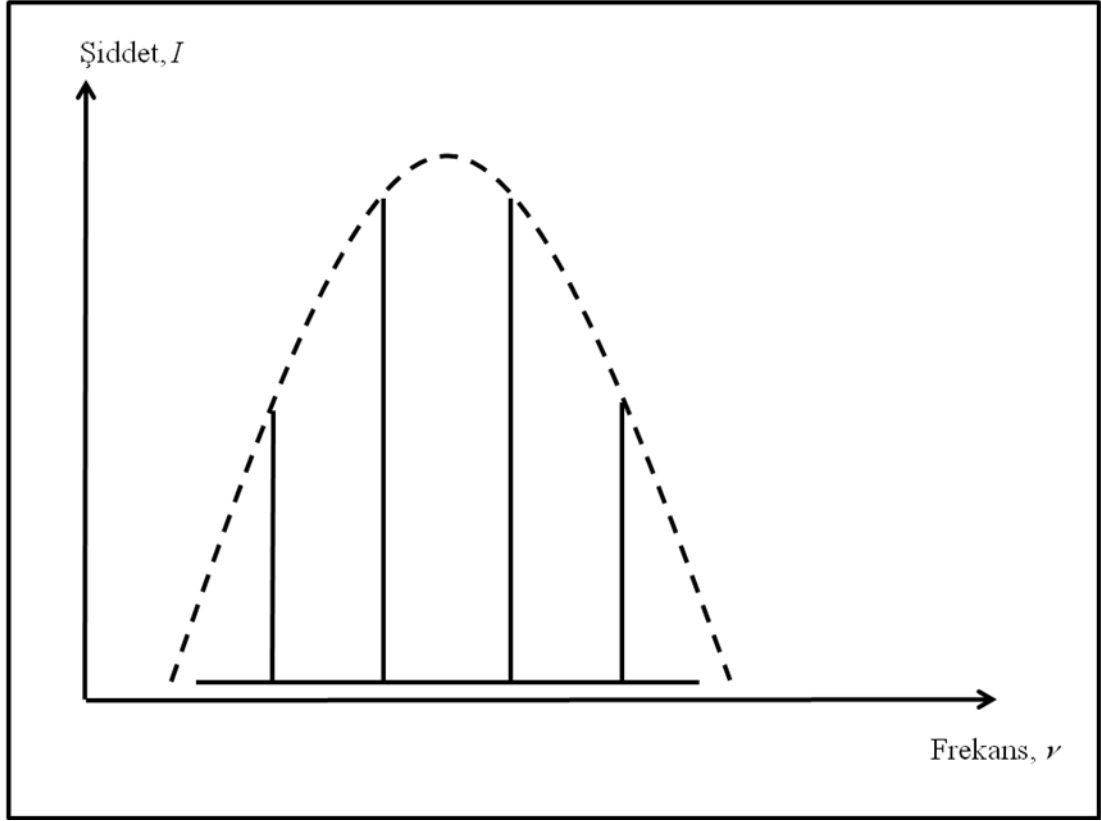


Şekil 2.17. Lazerin içerisindeki modların görünümü.

Lazer ışığı aslında modlardan oluşmaktadır. Şekil 2.17'de salımcı içerisindeki modlar gösterilmiştir. Bu modların arası $\delta\nu$ frekansı ile eşit şekilde ayrılmıştır. $\delta\nu$ frekansı eşitlik 2.12'deki gibi verilir.

$$\delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (2.12)$$

Burada; c , ışık hızı; L , lazerin içerisindeki aynalar arası uzaklık; $\delta\nu$, frekans aralığıdır.

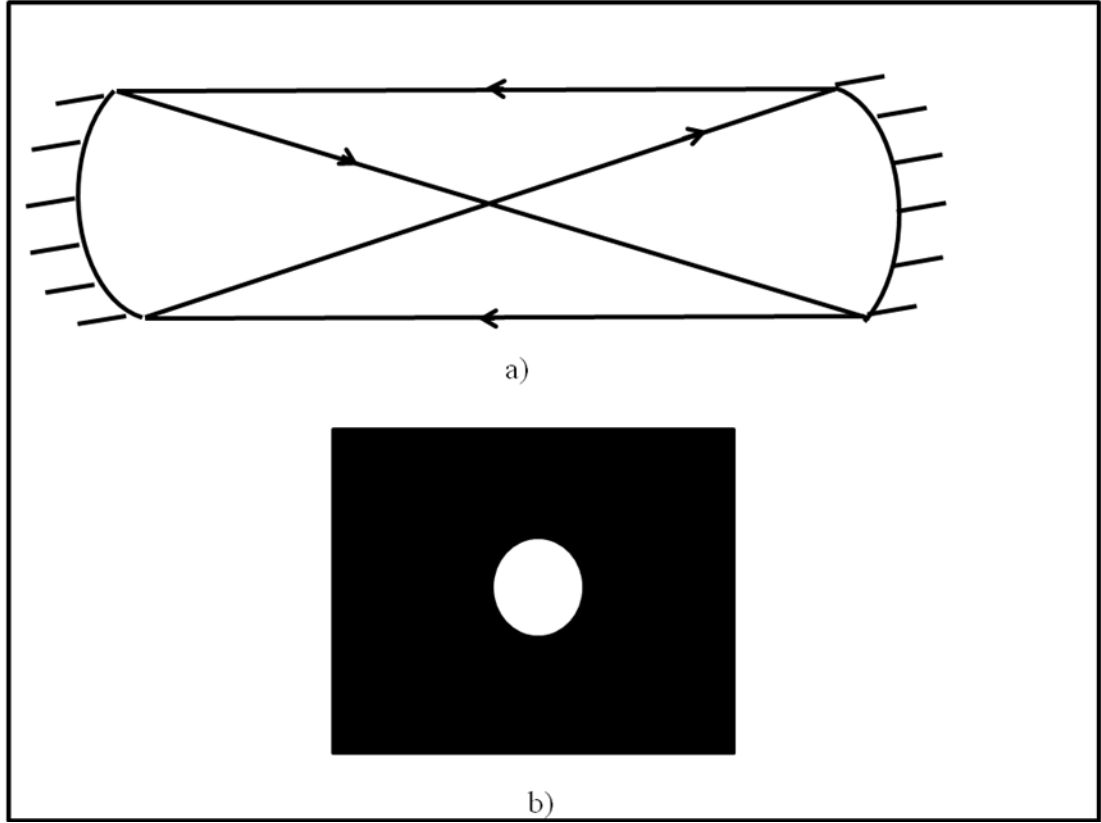


Şekil 2.18. Lazer içerisindeki kazanç eğrisi.

Lazerin içerisindeki geçiş çizgilerinin genişletilmiş eğrisi içinde bulunan dört mod Şekil 2.18’de gösterilmiştir. Bu dört moddan birine kilitlenen lazerler, daha hassas olurlar. Çalışılacak alana göre seçilen bu modlar, lazerlerin özel olmasını ve istenilen alanlarda kullanılmasını sağlarlar.

2.3.5.2. Enine modlar

Lazer içerisindeki iki ayna arasında geliş-gidiş yolunu tamamlayan dalgalar vardır. Bu dalgalar salınım sayısını arttırlar. Ancak, ilerledikleri yöne dik doğrultuda olan elektromanyetik alan özelliğini taşıdıkları için, bu dalgalara *enine mod* denir. Enine modlar TEM_{qr} olarak da ifade edilebilirler. Burada; q , ışın demetinin yatay doğrultusundaki minimum sayıyı temsil eder. r ise, ışın demetinin dikey doğrultusundaki sayıyı ifade eder [27].



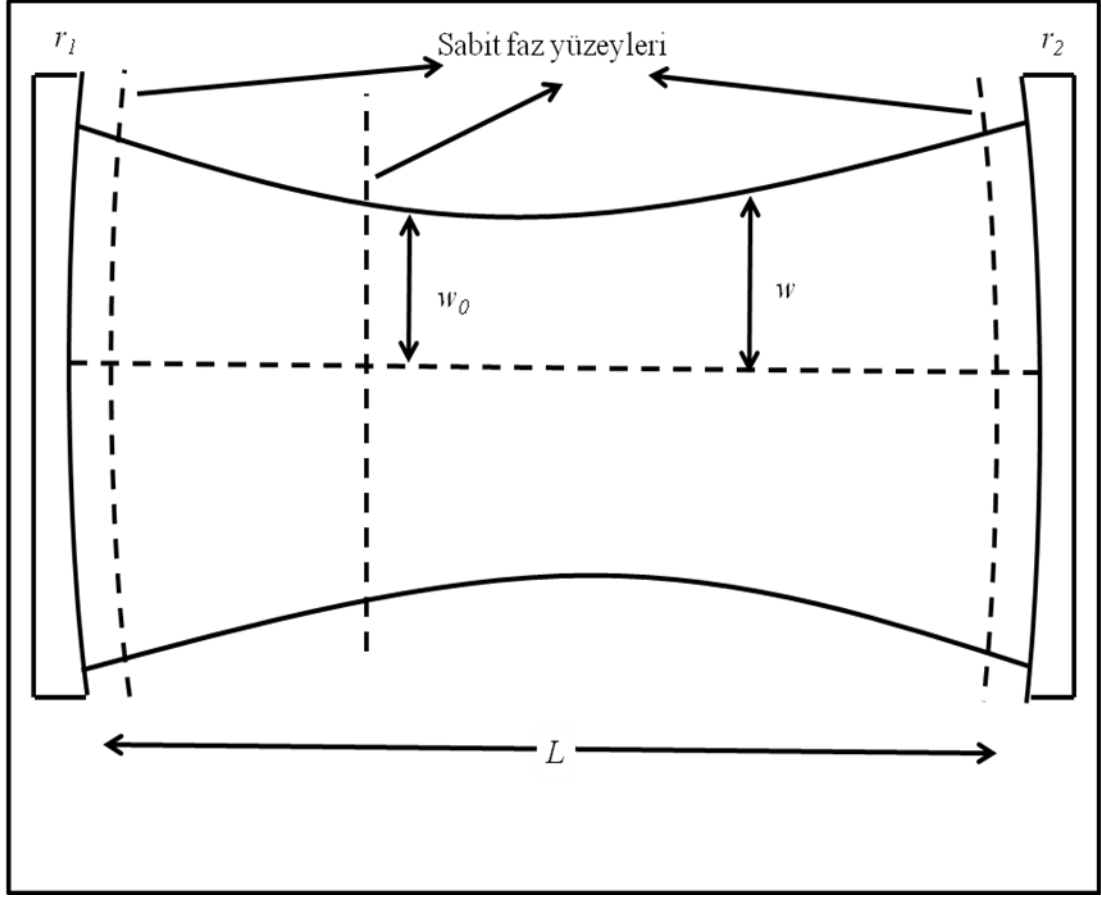
Şekil 2.19. a) Lazerin içinde bulunan iki ayna arasında salınım yapan ışın demetinin gösterimi, b) Temel enine modda çalışan (TEM₀₀) lazer cihazının bıraktığı iz.

Birçok lazer cihazının ürettiği ışın demeti Gauss ışınına uygundur. Gauss ışınına uygunluk varsa, lazer cihazı temel olarak enine modda çalışıyor demektir. Şekil 2.19.a'da gösterilen ışın demeti, kendi üstünden tekrar geri dönerek enine modları oluşturan ışına örnektir. Şekil 2.19.b'de gösterilen TEM₀₀ modu temel enine modu temsil etmektedir.

TEM₀₀ modunda elektrik alan değişimi eşitlik 2.13'deki gibi verilir.

$$E(x,y) = E_0 \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{w^2}\right) \quad (2.13)$$

Burada; x ve y , lazer eksenine dik doğrultulardır. Işın demetinin yanlara doğru açılması ise w değeri ile hesaplanır.

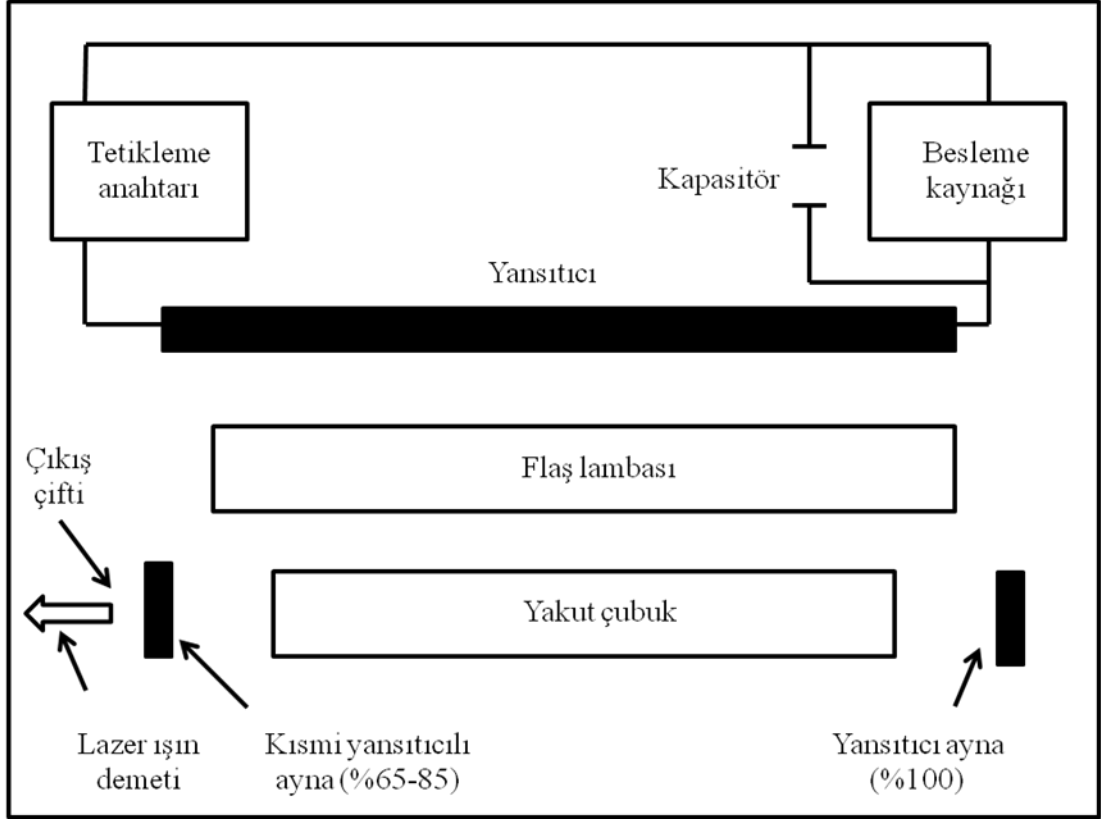


Şekil 2.20. Lazer rezonatöründe TEM₀₀ modu.

Lazerin enine modlarından TEM₀₀ modunun gösterimi Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Burada r_1 ve r_2 , lazerin içinde bulunan aynaların yarıçaplarıdır. L , salıncı uzunluğudur. w , demet alan genişliğidir. w_0 , w ’daki değişim oranıdır.

2.4. LAZER ÇEŞİTLERİ

Lazerin teorik çalışmalarındaki öncüleri Charles Townes ve Arthur Schawlow'dur. Bu iki fizikçinin çalışmaları, Theodore Maiman'ın 1960 yılında ilk çalışan lazeri yapmasında büyük kolaylık sağlamıştır.



Şekil 2.21. Theodore Maiman'ın 1960 yılında çalıştırmış olduğu ilk yakut lazer.

Maiman, yapmış olduğu yakut lazerin hammaddesi olarak, sarmal yapılu civa lambasına dizilmiş yakutu kullanmıştır. Lazer adını, bu yakuttan alır. Şekil 2.21'de bu lazer gösterilmiştir. Yakut çubuğun boyu 6 inç ve çapı 1 inçtir. Yakut çubuğun her iki ucu parlatılmış ve uçlarına ayna konulmuştur. Lazer işleminde alüminyum oksit içerisinde bulunan krom atomları görev alır. Flaş lambanın uyarılması sonucu, bu atomlar buldukları enerji seviyesinden bir üst seviyeye çıkarlar ve bir müddet sonra kendi enerji seviyelerine tekrar inerler. İnerken etrafa ısı ve ışık yayarlar. Böylece lazer işlemi gerçekleşmiş olur [29].

1960 yılında Maiman sayesinde hayatımıza girmiş olan lazerler, hızla gelişmeye devam etmektedir. Lazerlerin hassasiyetlerine göre, uygulama alanları artmaktadır. Çok uzak mesafelerin ölçümünde, malzeme kesiminde, füzelerin ve uyduların kontrolünde kullanılmıştır ve kullanılmaya devam etmektedir.

Lazerler; lazer ışığının elde edildiği maddelere göre gruplandırılırlar. Genel çalışma ilkeleri benzerdir. Güç kaynağı, lazer ortamı ve aynalardan oluşurlar. Lazer işleminin çalışması için; elektromanyetik bölgede ışın yayan aktif bir ortam, nüfus tersinmesi ve geri besleme mekanizması kesinlikle olmalıdır.

Lazerler; içlerindeki aktif ortama göre, lazer ışını hareketine göre, lazer dalga boylarına göre sınıflandırılırlar.

Lazer aktif maddesine göre;

- 1) Katı hal lazerleri
- 2) Boya lazerleri
- 3) Gaz lazerleri
- 4) Yarı iletken lazerler

Lazer ışını hareketine göre;

- 1) Devamlı ışın veren lazerler
- 2) Dalgalı akım olarak ışın veren lazerler
- 3) Nabızsal şekilde ışın veren lazerler

Lazer dalga boyuna göre;

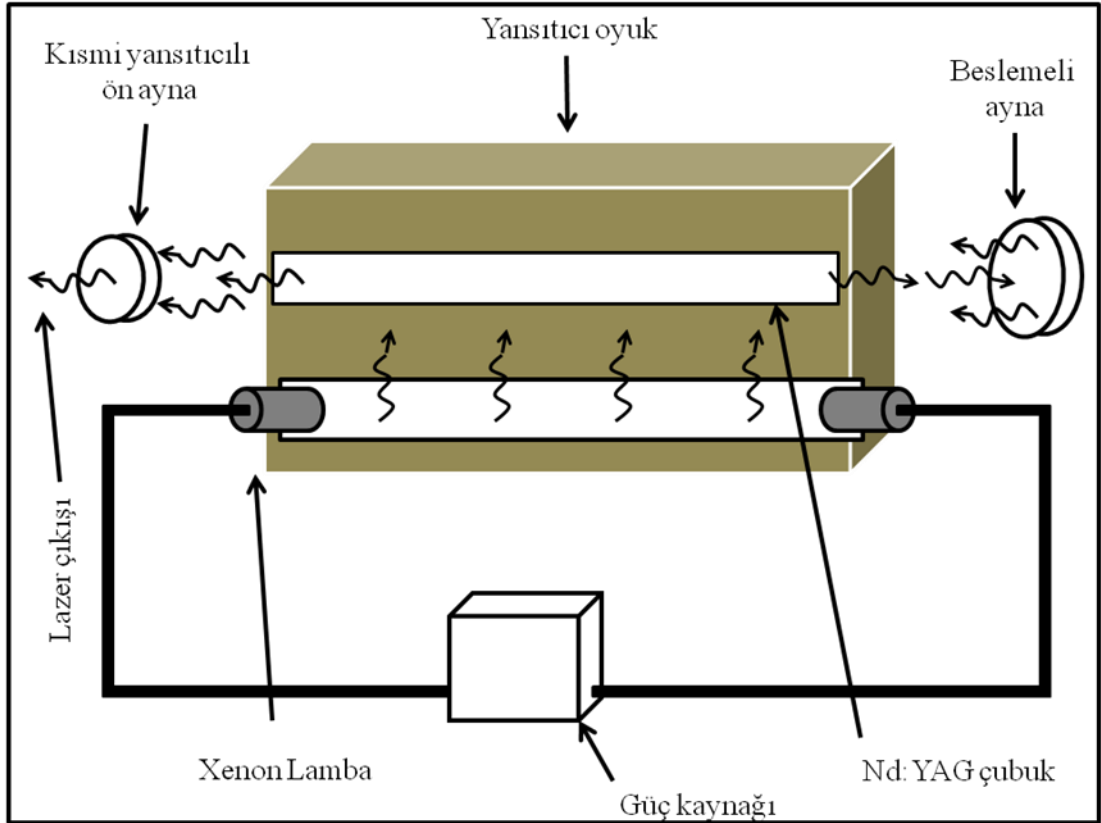
- 1) Morötesi lazerler
- 2) Görünen ışık lazerleri
- 3) Kızılötesi lazerler

2.4.1. Katı Hal Lazerler

1960'da Maiman'ın çalıştırmış olduğu yakut lazer, katı hal lazerlerine örnektir. İlk yakut lazer, sadece bir darbe ile çalıştırılmıştır. Ancak yapılan iyileştirmeler ile oda sıcaklığında ve sürekli çalışır hale getirilmiştir.

Yakut, az miktarda krom içeren alüminyum oksit kristaldir. Krom (Cr^{3+}) iyonları, alüminyum iyonlarıyla (Al^{3+}) yer değiştirerek, enerji seviyeleri sağlar. Bu iyonlar eski yerlerine dönerken, etrafa ısı ve ışık yayarlar [29].

Genellikle kırmızı ışık yayarlar. Kristal içindeki krom atomları, kırmızı rengi oluşturur. Katı hal lazerlerinin çalışması için, toprak elementleri kullanılır. Bu elementlerden biri de Neodimyum (Nd) elementidir. Bu elementin seçilme sebeplerinden en önemlisi; çok fazla pompalamaya ihtiyaç duymadan nüfus tersinmesi yapmasıdır. Alüminyum oksit kristalin çalışması için, oda sıcaklığının çok çok altına inilmesi gerekir. Bu nedenle bu tip lazerlerin güçlü soğutma sistemlerine sahip olması gerekir.



Şekil 2.22. Xenon lamba ile çalışan Nd:YAG (Yttrium Aluminium Garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) katkılı Neodimyum) katı hal lazeri.

Katı hal lazerlerinden en önemlileri; Nd:YAG lazerler, yakut lazerler ve aleksandrit lazerlerdir. Şekil 2.22'de Nd:YAG lazerin iç yapısı gösterilmektedir.

Yakut lazere benzer iç yapısı vardır. Xenon lamba pompalama görevi yapar. Nd:YAG çubuk, kristal malzemedir yapılmıştır. Genişliği en fazla 6 inç olabilir. YAG çubuk çok zor yapıldığı için, yakut çubuktan daha pahalıdır. Yapısı yakut lazerlerden farklıdır. Burada, alüminyum oksit kristali yerine itriyum, alüminyum ve garnet (lal taşı) kullanılmıştır. Sürekli çalışmaya daha elverişlidir. 1.06 µm dalga boylu fotonlar üretir. Üretilen bu fotonlar; kızılötesi bölgeye yakın olduklarından, görünmezler [30].

Katı hal lazerlerinden bazılarının özellikleri Tablo 2.3’de verilmiştir. Bu tablodaki terimlerden seviye tipi; enerji geçiş seviyelerinin sayısını belirtmektedir. Pompalama enerjisi; flaş lambanın nüfus tersinmesi olması için sağlaması gereken enerjiyi belirtmektedir. Verim; lazerden çıkan ışının gücünün, flaş lambadan çıkan ışının gücüne oranını belirtmektedir [31].

Tablo 2.3. Katı hal lazerlerinin bazı özellikleri.

Özellikler	Aleksandrit	Yakut	YAG	Nd:Cam(fosfat)
Seviye tipi	4	3	4	4
Dalga uzunluğu (nm)	700-815	694	1064	1056
Pompalama enerjisi (J)	10	200	4	4
Verimi	2.5	0.5	2.5	3.5
Isı geçirgenliği (W/cm-K)	0.23	0.35	0.13	0.0074

Katı hal lazerlerinin; dalga boyu, ömrü ve frekans karakteristikleri Tablo 2.4’de verilmiştir. Burada; yakut lazer, Nd:YAG lazer, Nd:Cam lazer, aleksandrit lazer, Ti:Al₂O₃ lazer ve Cr:LiSAF lazerin karakteristikleri verilmiştir.

Tablo 2.4. Bazı katı hal lazerlerin karakteristikleri.

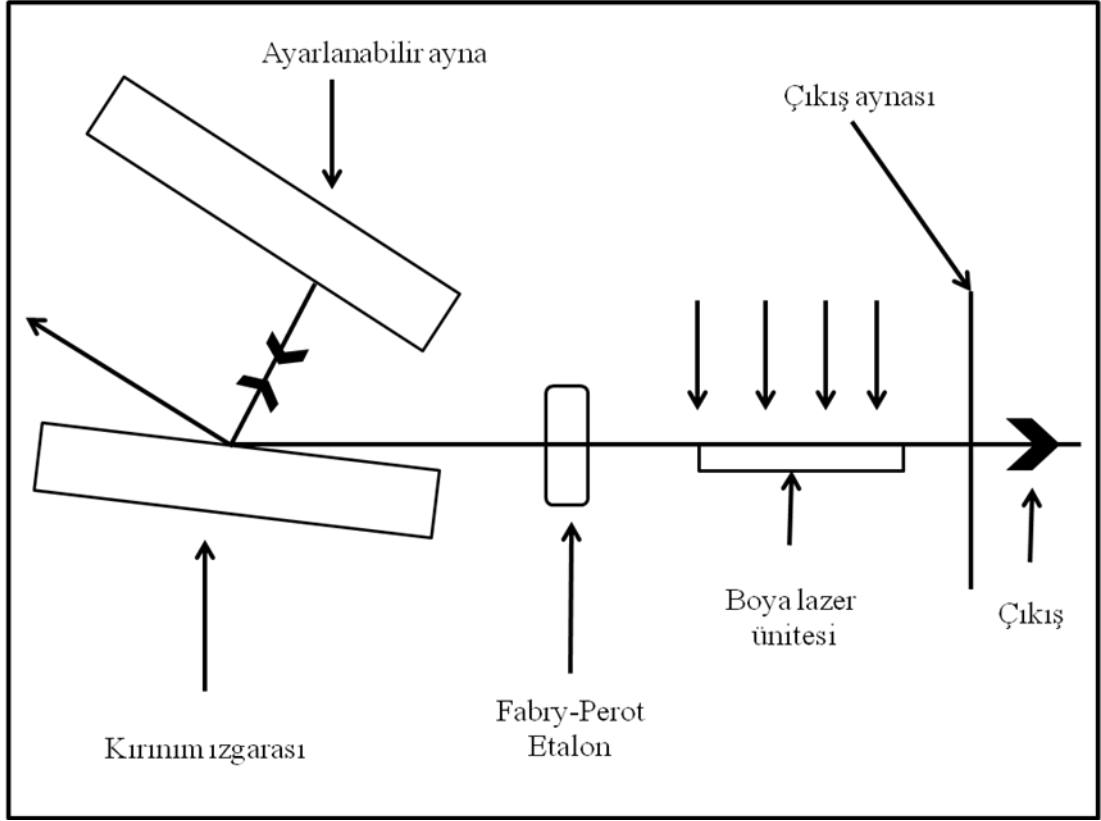
Lazer tipi	Lazer dalga boyu(nm)	Üst seviye ömrü(μ s)	Yutması (Hz)
Cr:Al ₂ O ₃ (Yakut)	694.3	3000	3.3×10^{11}
Nd:YAG	1064.1	230	1.2×10^{11}
Nd:Cam	1054-1062	≈ 300	7.5×10^{12}
Cr:BeAl ₂ O ₃ (Aleksandrit)	700-800	260	$\approx 5 \times 10^{13}$
Ti:Al ₂ O ₃	660-1180	3	$\approx 1.5 \times 10^{14}$
Cr:LiSAF	800-1050	67	$\approx 9 \times 10^{13}$

Katı hal lazerleri; ölçme işlemlerinde, elmas malzemelerin kesiminde, atomik malzemelerin parçalanmasında kullanılmaktadır.

2.4.2. Boya Lazerler

Bu tip lazerler yüksek yoğunluklu lambaların yapmış olduğu pompalama ile çalışırlar. Lazer ortamında kullanılan organik boyalardan dolayı bu lazerlere boya lazerleri denilmektedir. Bu boyalara; Rhodamine 6G ve Xantene örnek verilebilir.

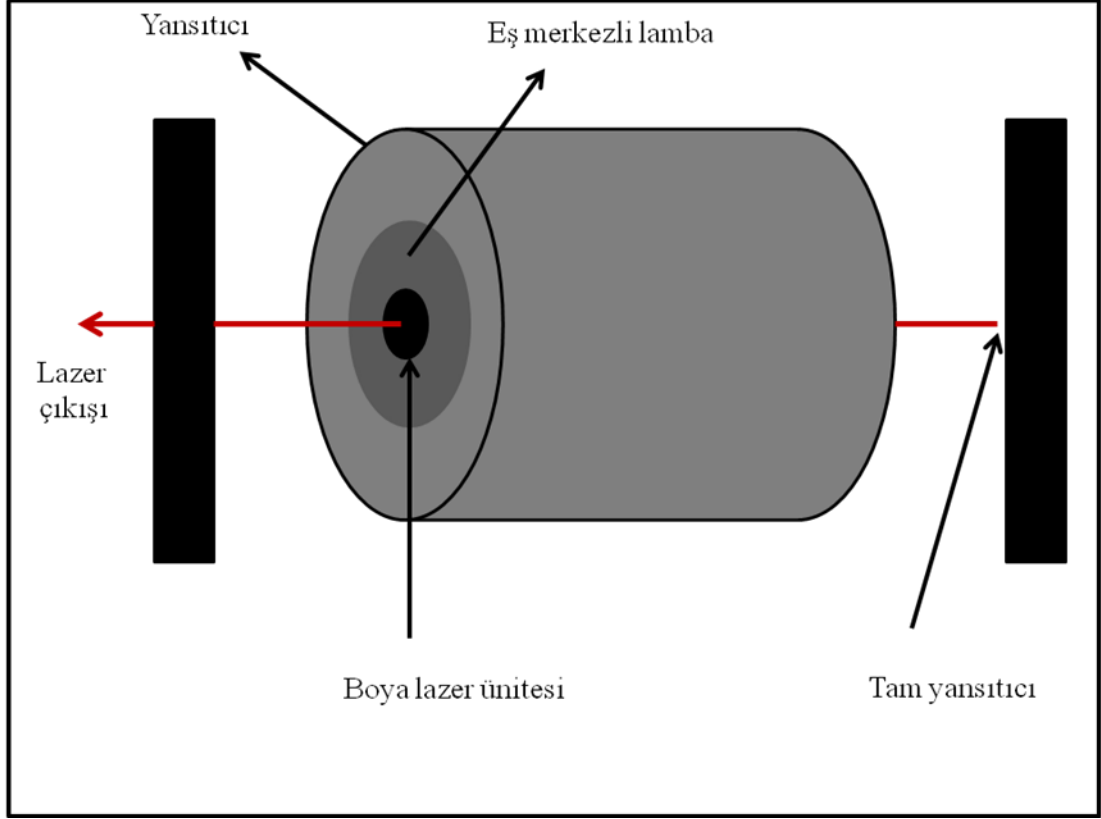
Boya lazerlerinin en önemli özelliği frekans aralığının istenilen düzeye ayarlanmasıdır. Lazer ortamının içerisinde çok sayıda atom olduğundan çok sayıda enerji düzeyi vardır. Boyaların birleştirilme oranları değiştirilerek istenilen dalga boylarındaki ışıklar yakalanabilir [32].



Şekil 2.23. Boya lazerin şematik düzeni.

Bu tip lazerlerin çalıştırılması için pompalama ünitesine ihtiyaç duyulur. Şekil 2.23’de boya lazerinin şeması gösterilmiştir. Pompalama için iyon lazer kullanılmıştır. Sürekli çıkış için kullanılan bu mekanizma, darbeli lazer çıkışı sağlamaktadır. Kırınım ızgarası ve ayarlanabilir ayna sayesinde lazer çıkışı istenilen şekilde ayarlanabilir.

Flaş lambanın ışın vermesiyle, sıvı boya molekülleri harekete geçer. Bu durum geri besleme mekanizması devreye girene kadar devam eder. Boya moleküllerinin enerjisi artar ve enerji seviyeleri arası geçiş oluşur. Bu geçişlerde lazer ışını yayılır. Kırınımın ızgarasının açısına bağlı olarak farklı renklerde ışık elde edilir.

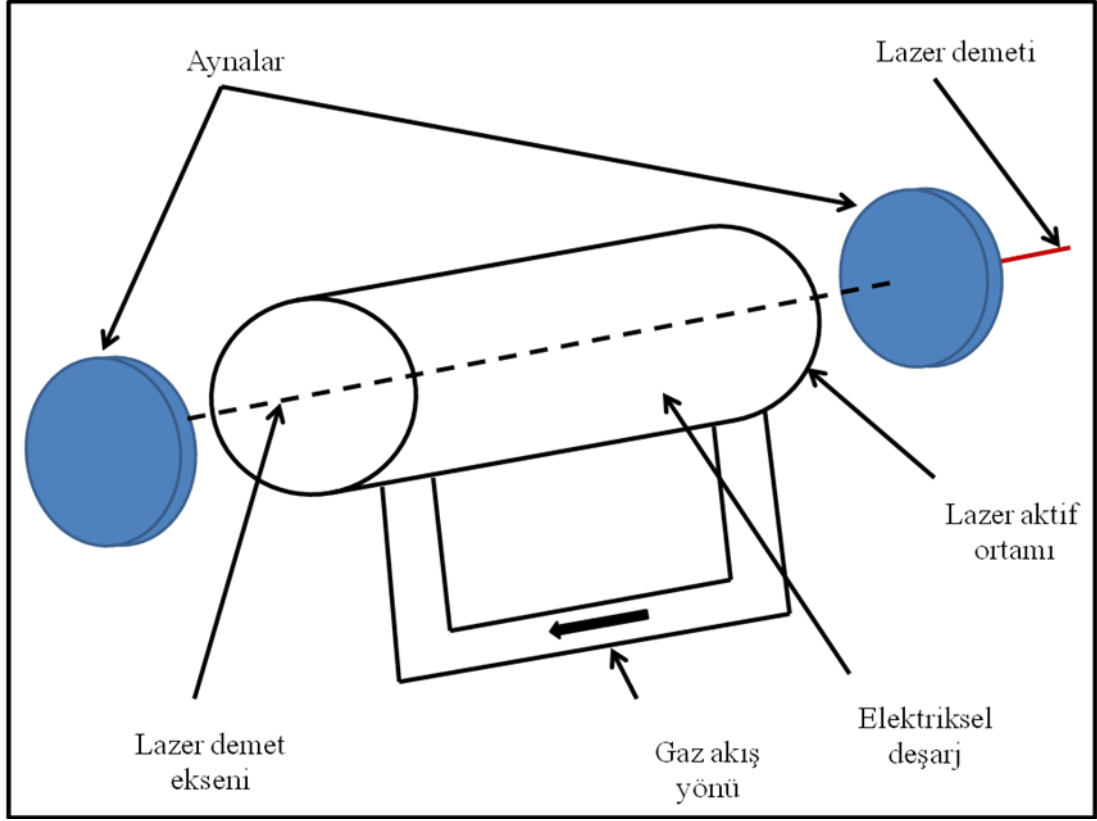


Şekil 2.24. Boya lazerin genel görünümü.

Boya lazerlerin kapalı haldeki görüntüsü Şekil 2.24’de verilmiştir. Ayarlanabilir elemanları sayesinde kimyasal analiz yapmak oldukça kolaydır. İnce film kaplamaların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin araştırılmasında kullanılmaktadır.

2.4.3. Gaz Lazerler

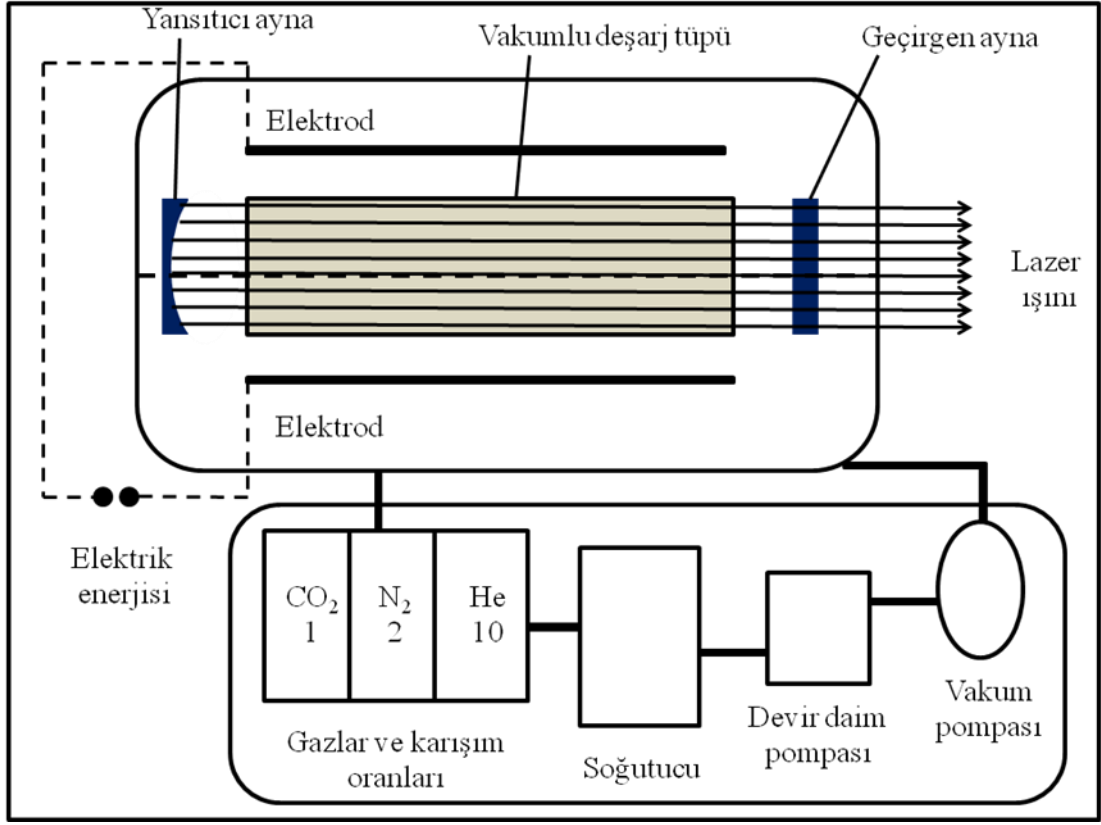
En fazla kullanılan lazer çeşididir. İlk gaz lazer helyum-neon (He-Ne) gaz karışımıyla yapılmıştır. On birim helyum gazına karşılık, bir birim neon gazı karıştırılarak elde edilmiş gaz karışımı lazerin aktif ortamında kullanılmıştır. Helyum gazı fazla olduğu için, elektronlar He atomlarına çarparlar.



Şekil 2.25. Gaz lazerlerin genel çalışma yapısı.

Uyarılan He atomları, Ne atomlarıyla çarpışarak, enerji aktarımı yaparlar. Neon atomları tekrar kendi enerji seviyelerine dönerken, kırmızı lazer ışığı yayarlar. Şekil 2.25'te gösterildiği gibi aynalar vasıtasıyla gerekli seviyeye ulaşıldığında, lazer ışığı elde edilmiş olur. He-Ne gaz lazerinin ışın demeti 632.8 nm dalga boyuna sahiptir [33].

Diğer gaz lazer çeşidi de karbondioksit (CO_2) gaz lazeridir. 1964 yılında Patel tarafından icat edilmiştir. İlk kez Bell laboratuvarında çalıştırılmıştır.



Şekil 2.26. Karbondioksit (CO₂) gaz lazerinin iç yapısı.

İlk karbondioksit (CO₂) lazeri 1 mW gücünde ve % 0.0001 verimliliğindedir. Ancak Şekil 2.26'da gösterildiği gibi karbondioksit (CO₂) gazına, nitrojen (N₂) ve helyum (He) gazları eklenince, gücü 100 W ve verimliliği % 6 olan gaz lazer elde edilmiştir [34].

Günümüzde gaz lazerler; deri ve plastik gibi organik malzemelerin kesilmesinde, delinmesinde kullanılır. Metal tabakalar, bu lazerler sayesinde buharlaştırılabilir.

2.5. YARI İLETKEN DİYOT LAZERLER

Temel olarak atomun yapısı incelendiğinde; bir çekirdek ve çekirdeğin etrafındaki yörüngelerden oluşmuştur. Çekirdeğin içerisinde; proton ve nötron vardır. Yörüngesinde ise elektronlar yer alır. Bu yörüngelerden en dıştakine *valans bant* denir. Valans bandında bulunan elektronlar uyarıldıklarında, iletim bandına geçiş yaparlar [35].

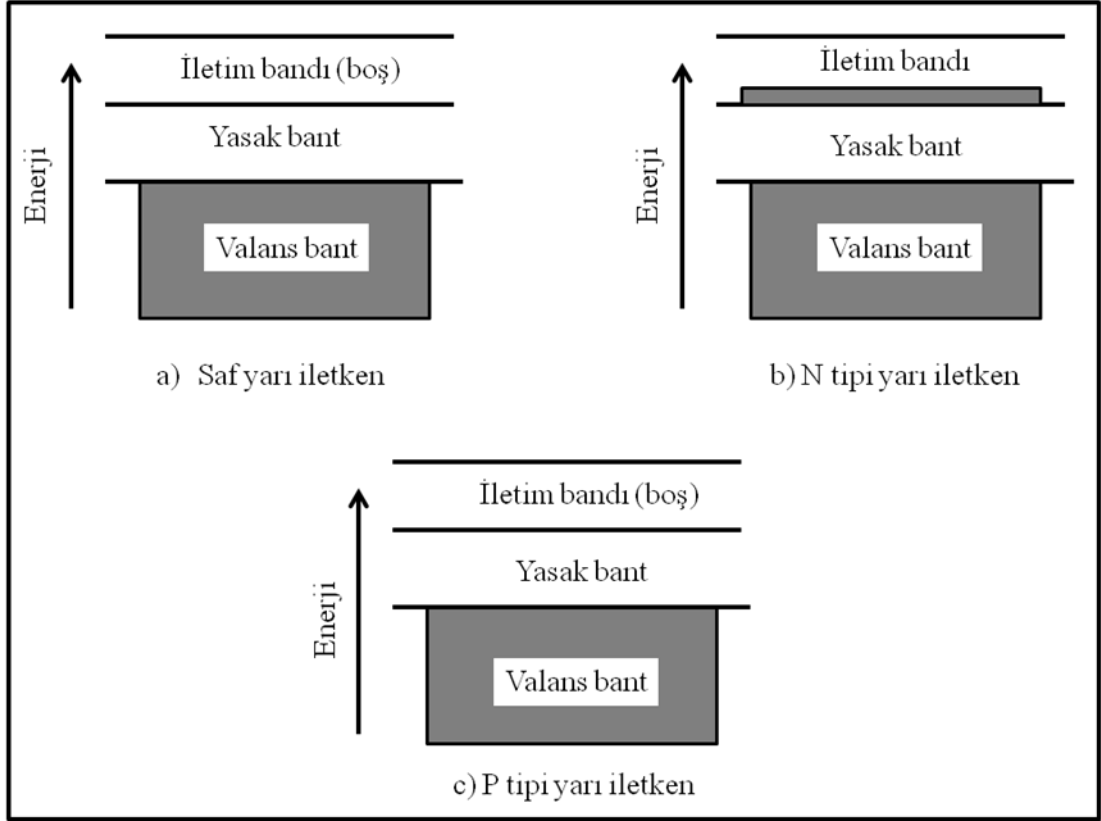
Yarı iletken malzeme yapılırken üç tür malzeme kullanılabilir. Bunlar; silikon, karbon ve germanyumdur. Bu malzemelerin valans bantlarında çok sayıda elektron bulunur. Tercih edilme sebepleri, yapılarında çok fazla elektron bulundurmalarındandır.

Uyarılmış elektronun eğer enerji seviyesi farklı ise, bulunduğu banttan diğer banda geçiş yapar. Bir ortamdan diğer bir ortama geçiş, ışığın salınması ya da soğurulmasıyla mümkündür. Protonların salınım yaptığı ya da soğurduğu bu enerji, elektromanyetik dalgadır. Yayılan bu dalgaya *foton* denir. Fotonun enerjisi iki enerji seviyesi arasındaki farka eşittir. Bu eşitlik 2.14'deki gibi verilmiştir.

$$\lambda = \frac{ch}{E_2 - E_1} \quad (2.14)$$

Burada; c , ışık hızıdır. h , Planck sabitidir. λ , dalga boyudur. $E_2 - E_1$, enerji seviyeleri arasındaki farktır.

En çok kullanılan diyot lazer galyum alüminyum arsenid (GaAlAs)'dir. Bu diyot lazer sürekli çalıştırılabilir. 750 nm ile 820 nm arası dalga boyuna sahip ışık üretebilir. Bu tip lazerlerin gücünü arttırmak için indiyum fosfor (InP) ile katkılama yapılabilir.



Şekil 2.27. Yarı iletken tipine göre enerji seviyeleri, a) Saf yarı iletkenin enerji seviyesi, b) N tipi yarı iletkenin enerji seviyesi, c) P tipi yarı iletkenin enerji seviyesi.

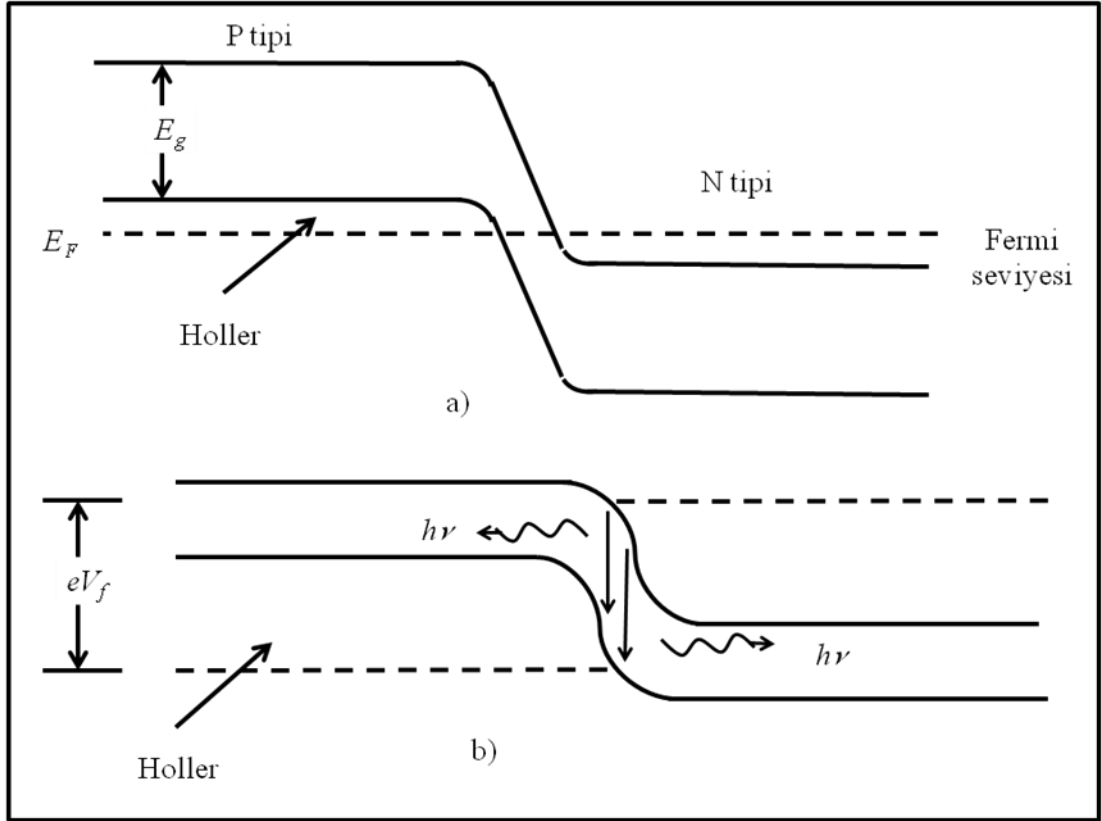
Yarı iletkenlerdeki enerji seviyeleri Şekil 2.27’de gösterilmiştir. Burada gösterilen valans bant, enerji seviyesi en düşük banttır ve içerisinde hol denilen boşluklar bulunur. Bu boşluklar, elektronlar sayesinde oluşur. İletim bandına geçiş yapan bir elektron, valans banda bir boşluk bırakır. Elektronlar çok soğutuldukları zaman, valans bantta toplanırlar. Üzerinde hiç elektron bulundurmayan banda *yasak bant* denir. En dar ve boş olan banda *iletim bandı* denir. Valans banttaki elektronlar, yeterli sıcaklığa ulaştıklarında; yani yeterli enerjiye geldiklerinde, iletim bandına geçerler [36].

Şekil 2.27.a’da, saf yarı iletkenin enerji seviyeleri gösterilmiştir. Burada her zaman elektronların sayısı, boşlukların sayısına eşittir. Şekil 2.27.b’de N tipi yarı iletken gösterilmiştir. Burada iletim bandına elektron katılması yapılar ve iletim bandındaki elektronların sayısı, valans banttaki boşlukların sayısından fazla hale getirilir. Şekil 2.27.c’de P tipi yarı iletken gösterilmiştir. Burada valans banda boşluklar ilave edilerek, katkı yarı iletken malzeme yapılmıştır. P tipi yarı iletken

malzeme ile N tipi yarı iletken malzemeler birleştirilerek, yarı iletken diyot yapılabilir.

2.5.1. Diyot Lazerlerin Çalışma Prensibi

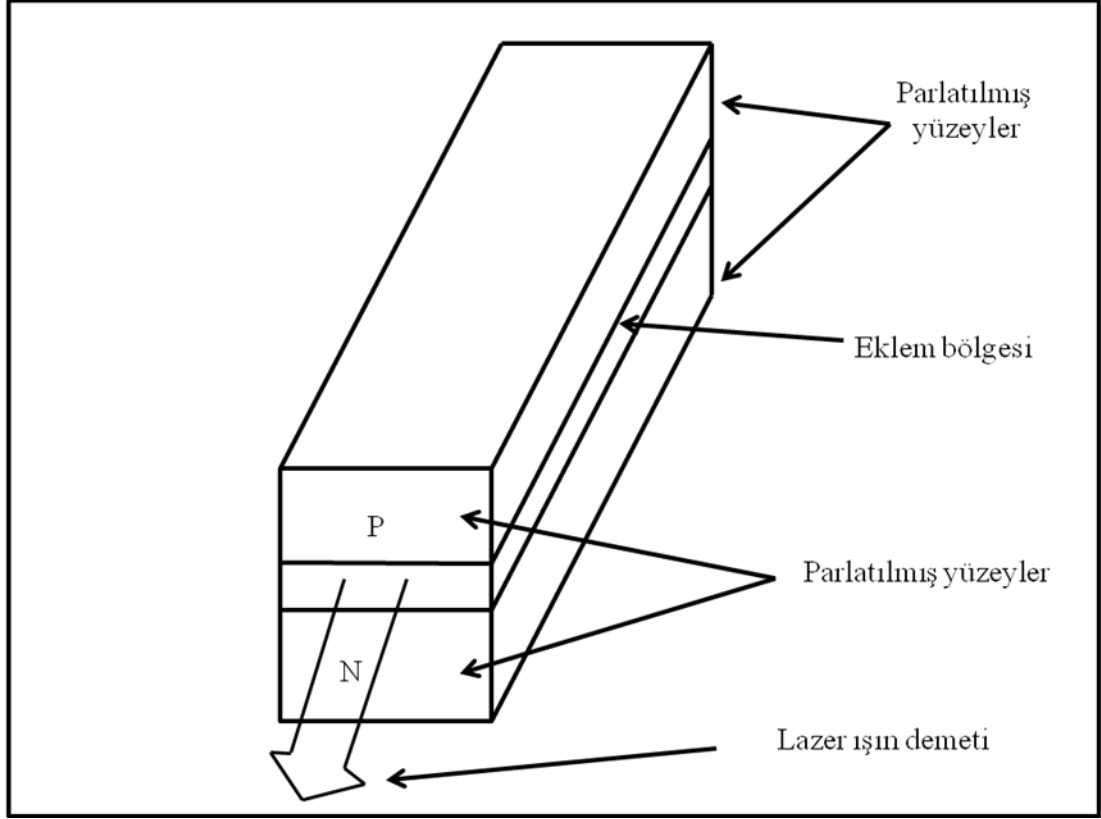
Diyot lazerin pompalanması için gerilim uygulanır. Uygulanan bu gerilim, elektronları ve boşlukları P ve N tipi yarı iletkenlerin birleşme bölgesine iter. Bu birleşme bölgesine *eklem* denir. Elektronlar ve boşluklar eklem bölgesinde birleşerek taşıyıcı enjeksiyonu oluştururlar.



Şekil 2.28. Birleştirilmiş PN tipi yarı iletken, a) Denge gerilim uygulandığında oluşan Fermi enerji seviyesinin şeması, b) Pozitif yönde gerilim uygulandığında Fermi enerji seviyesinin şeması.

Şekil 2.28.a'da E_g ; enerji aralığıdır, E_F ; Fermi enerjisidir. Fermi enerjisi; kuantum sistemlerinde en düşük ve en yüksek seviyede dolu olan parçacıklar arasındaki enerji farkını temsil eder. Yarı iletken diyot lazerin uyarılmış salınım yapabilmesi için, elektronların ve boşlukların bir arada bulunması gerekir. Bu iki yapıyı bir arada tutmanın bir yolu, Şekil 2.28.b'deki gibi eklem bölgesine pozitif

yönde bir gerilim uygulamaktır. Foton demetinin hızı V_f ile gösterilirken, fotonun enerjisi $h\nu$ ile gösterilmiştir. e ; elektronu temsil eder.

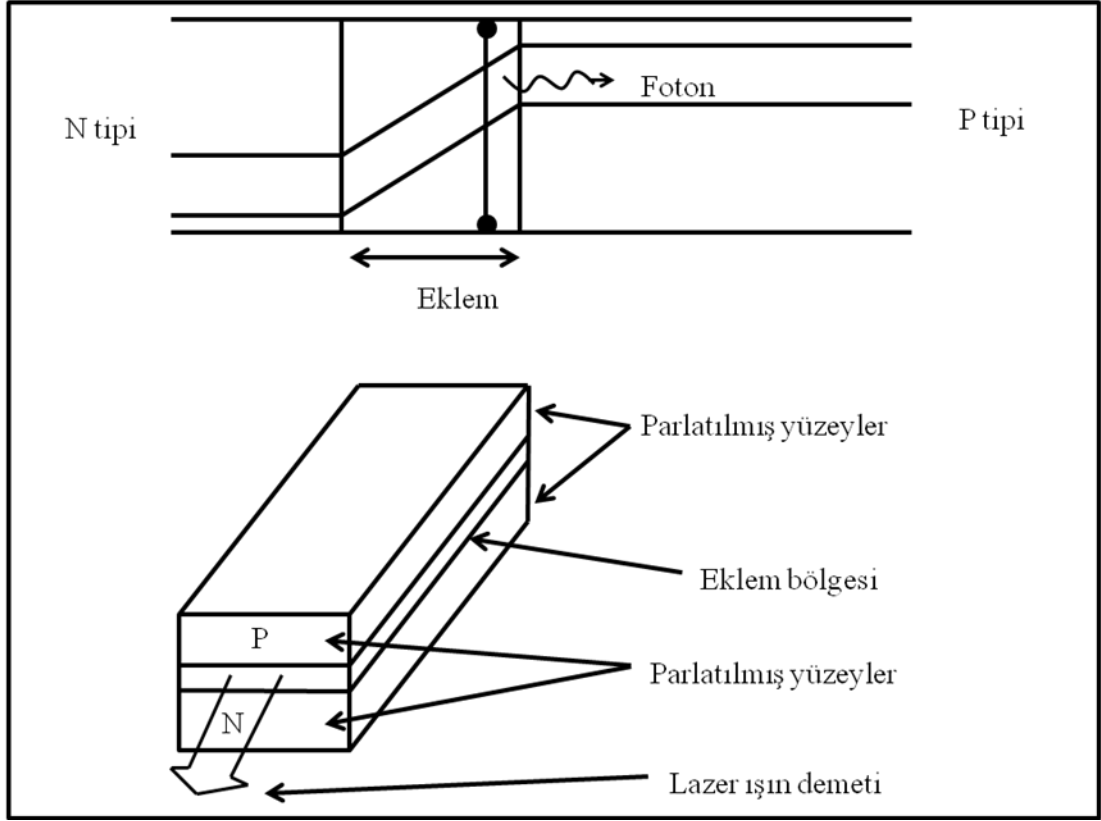


Şekil 2.29. P ve N tipi yarı iletkenlerin birleştirilme şeması.

Diyottan lazer ışığı elde edilebilmesi için, Şekil 2.29'daki gibi P ve N tipi yarı iletkenlerle birleştirilmiş malzemenin iki ucu parlatılmalıdır. Bu parlak yüzeyler ayna görevi yaparlar. Lazer ışığının oluşabilmesi için nüfus tersinmesi gereklidir. Eklem bölgesine pozitif yönde gerilim uygulanarak, nüfus tersinmesi sağlanır. Kazancın kayıptan fazla olması durumunda, yarı iletkenlerden diyot lazer yapımı sağlanmış olur.

2.5.2. Eklem Tipleri

İki yarı iletkenin birleşme noktasına *eklem bölgesi* denir. Eklem bölgesine gerilim uygulandığından, güç en fazla bu bölgede bulunur.



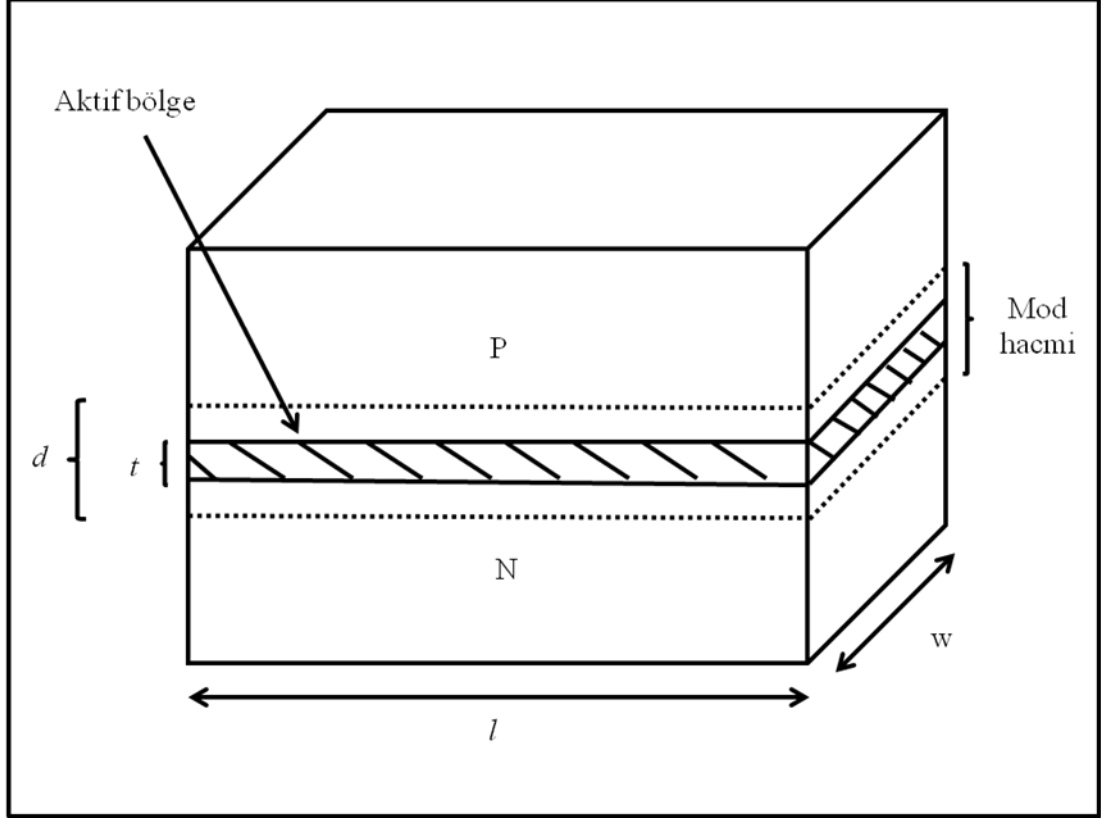
Şekil 2.30. PN tipi yarı iletken diyot yapısı.

Şekil 2.30'da iki yarı iletkenin birleşim bölgesi gösterilmiştir. En çok kullanılan yarı iletken diyot lazer, galyum arsenidden (GaAs) oluşan yarı iletken diyot lazerdir. Kırılma indisi 3.6'dır. Eklem bölgesinde yoğunluğu 20000 A/cm^2 'dir. Homojen eklemli diyot lazerlerdir. Işıldama eşiği 2 A ile 30 A arasında değişmektedir. Eklem bölgesinin gerilimi 2 V'dur. Şekil 2.30'da homojen eklemli diyot gösterilmektedir.

Diğer bir eklem çeşidi de heterojen eklemli diyotlardır. Bu yapılar, homojen yapıli diyotların iyileştirilmesi için kullanılır. Galyum arsenid (GaAs) içeren yarı iletken diyot lazere alüminyum (Al) eklendiğinde, parlak yüzeylerin kırılma indisi azaltılmış olur. Eğer alüminyum her iki tarafa da eklenirse, çift hetero yapıli alüminyum galyum arsenid (AlGaAs) yarı iletkeni meydana gelir. Bu yapının lazer eşiği, tek hetero eklemli lazerin eşiğine göre on kat daha azaltılmıştır [37].

2.5.3. Diyot Lazerlerin Karakteristikleri ve Uygulama Alanları

Yarı iletken diyot lazerlerin eklem bölgelerine pozitif yönde gerilim uygulandığında, nüfus tersinmesi olur ve lazer ışığı elde edilir.



Şekil 2.31. Yarı iletkenin aktif bölgesi ve mod hacmi.

Elektronlar ve holler Şekil 2.31’de gösterilen ve aktif bölge olarak adlandırılan bölgede toplanırlar. Burada aktif bölge t kalınlığındadır. Lazer ışığından çıkan elektromanyetik dalgaların sıkıştırıldığı bölgeye de *mod hacmi* denir. Şekil 2.31’de gösterilen yarı iletkenin mod hacminin kalınlığı d kadardır. Burada $t < d$ kabul edilir. Bunun sebebi; mod hacminde elde edilen elektromanyetik dalganın aktif bölge içerisinde sınırlanmasını sağlamaktır. Mod hacmi $w \times l \times d$ ölçülerinde olan yarı iletken lazerin nüfus tersinmesinin yoğunluğunu hesaplamak için eşitlik 2.15 kullanılır.

$$N_{th} = N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 = \frac{d}{t} \left(\frac{8\pi v_0^2 k_{th} \tau_{21} \Delta v_n^2}{c^2} \right) \quad (2.15)$$

Burada; d , mod hacminin kalınlığıdır. t , aktif bölgenin kalınlığıdır. c , ışık hızıdır. k_{th} , kazanç katsayısıdır. τ_{21} , ikinci enerji seviyesi ile birinci enerji seviyesi arasındaki geçiş ömrüdür. Δv_n , geçiş çizgi genişliğidir. N_l , aktif bölgedeki hollerin fazla oluşundan dolayı ihmal edilirse, eşitlik 2.16 kullanılır.

$$(N_2)_{th} = \frac{d}{t} \left(\frac{8\pi v_0^2 k_{th} \tau_{21} \Delta v_n^2}{c^2} \right) \quad (2.16)$$

Lazer diyotunun sahip olduğu akım yoğunluğu eşitlik 2.17 ile verilir.

$$J_{th} = \frac{et(N_2)_{th}}{\tau_e} \quad (2.17)$$

Burada; τ_e , elektronun ömrüdür. et , bir saniyedeki elektron sayısıdır. $(N_2)_{th}$ (2.16) formülünde yerine konulursa, eşitlik 2.18 elde edilir.

$$J_{th} = \frac{etd}{\tau_e t} \left(\frac{8\pi v_0^2 k_{th} \tau_{21} \Delta v_n^2}{c^2} \right) \quad (2.18)$$

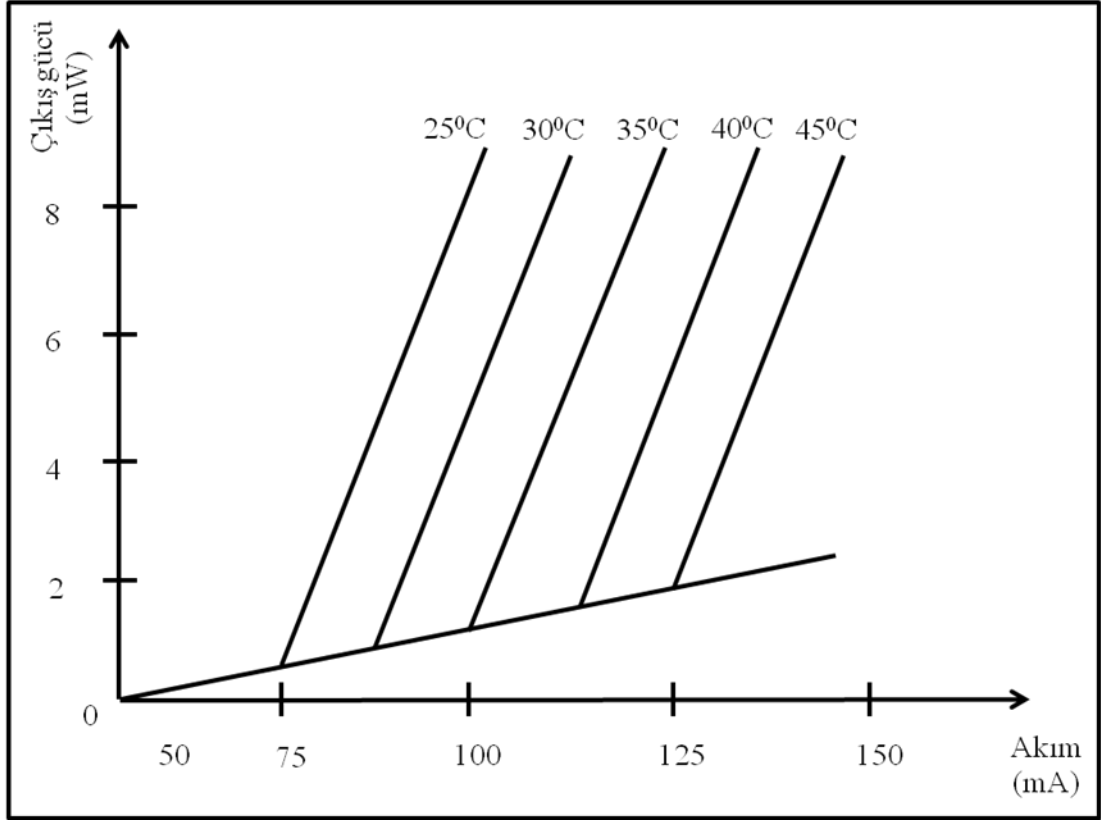
Bu formülde k_{th} , eşitlik 2.19'da verilmiştir.

$$k_{th} = \gamma + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (2.19)$$

Formül (2.17)'de k_{th} yerine konulduğunda, eşitlik 2.20 elde edilir.

$$J_{th} = \frac{etd}{\tau_e t} \left(\frac{8\pi v_0^2 \tau_{21} \Delta v_n^2}{c^2} \right) \left(\gamma + \frac{1}{2l} \ln \left[\frac{1}{R_1 R_2} \right] \right) \quad (2.20)$$

Diyot lazerlerin çalışmasında ortam sıcaklığı çok önemlidir. Özellikle galyum arsenid (GaAs) ve alüminyum galyum arsenid (AlGaAs) bulunduran yarı iletken diyot lazerler farklı sıcaklıklarda farklı güçlerde lazer ışığı yayarlar. Lazer diyotuna sabit akım verilirse, ortam sıcaklığına bağlı olarak lazer ışığının çıkış gücünde değişir. Ortam sıcaklığı değiştikçe, verilen akım değeri de değişirse, lazer ışığının çıkış gücü sabit kalabilir.



Şekil 2.32. Yarı iletken diyot lazerin ortam sıcaklığına bağlı olarak akım-güç değişim grafiği.

Yarı iletken diyot lazerlerin Şekil 2.32’de akım-güç değişimi gösterilmiştir. Oda sıcaklığında (25 °C) 75 mA’de yaklaşık 1 mW’lık güce sahip olan yarı iletkenin, sıcaklık artışı oldukça, çıkış gücünde de artış olduğu gözlenmiştir.

Yarı iletken diyot lazerlerin özelliklerini genel olarak sıralarsak,

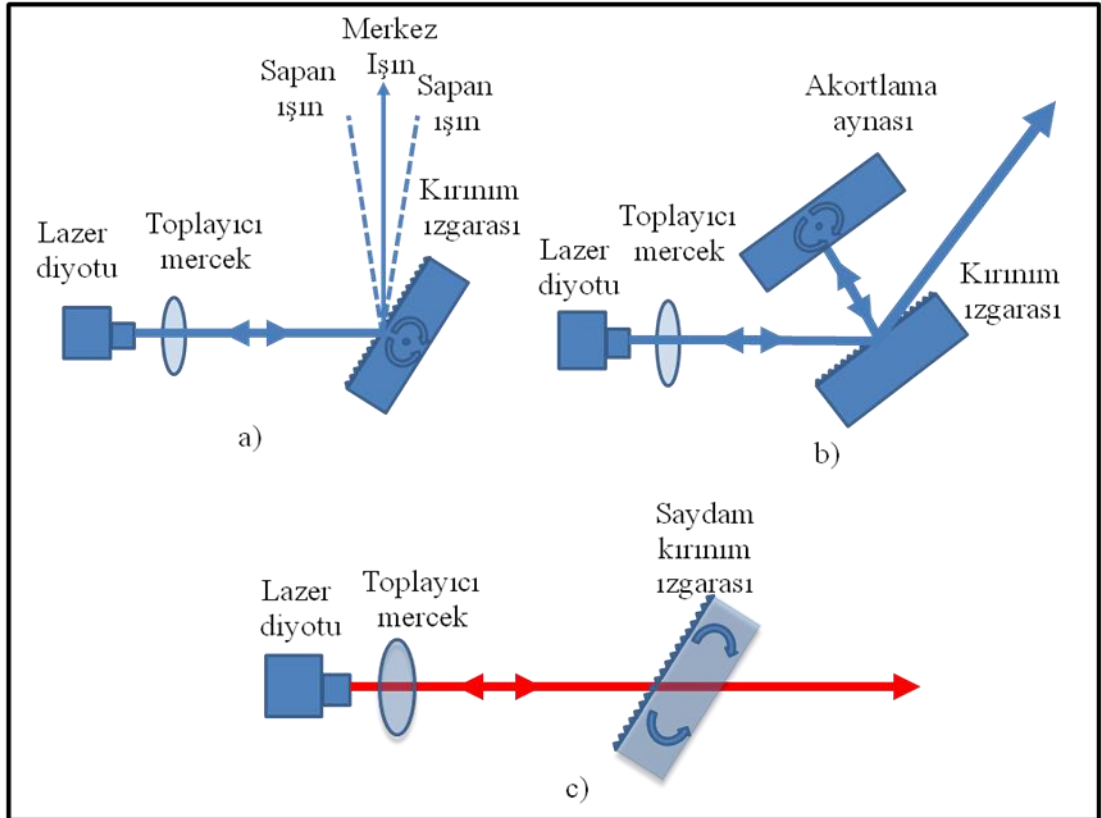
- 1) Yüksek frekansta kararlı değiller.
- 2) Çıkış güçleri sınırlıdır.
- 3) Aşırı ısınma sorunu olduğundan, soğutma sistemleri geliştirilmelidir.
- 4) Farklı dalga boyunda lazer ışığı üretmezler [38].

Yarı iletken diyot lazerlerin kullanım alanları oldukça geniştir. CD çalarlarda, video oynatıcılarda lazer yazıcılarda, faks makinelerinde, tıbbi cihazlarda, biyomedikal alanda, uydu ve haberleşme cihazlarında, fiber optik haberleşmede ve malzeme işlemede kullanılırlar.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. HARİCİ OPTİK SALINICILI DİYOT LAZER SİSTEMİ

Harici optik salıncılı diyot lazer sistemi frekans seçici olarak kullanılan en önemli düzendir. Diyot lazerler sıcaklığa ve akıma karşı çok hassas olduklarından bu tip lazerlerle çalışmak oldukça güçtür. Akım ve sıcaklık kararlı hale getirildikten sonra, kırınım ızgarası yardımıyla frekans seçicilik sağlanabilir.



Şekil 3.1. Harici optik salıncılı diyot lazer sisteminin iç yapısı, a) Littrow düzeni, b) Littman-Metcalf düzeni, c) Tez kapsamında kurmayı planladığımız saydam kırınım ızgaralı Littrow düzeninde harici optik salıncılı lazer sisteminin şematik gösterimi.

Akortlanabilir harici optik salıncılı lazer sisteminin temelini Şekil 3.1’de gösterildiği gibi kırınım ızgarası, lazer diyotu ve mercek oluşturmaktadır. Mercek, lazer ışığının sapma açısını azaltmak ve paralel bir ışık oluşturmak için kullanılır. Burada ışığın bir kısmı kırınım ızgarasından geri yansıtılır ve lazerin aynı frekansta kalması sağlanır. Izgaranın iki özelliği vardır. Bunlar; frekans seçme ve yansıtma.

Frekans seçme (akortlama), lazer ışığının ızgara yüzeyine gelme açısının değiştirilmesi ile gerçekleştirilir. Hassas bir ölçüm yapılabilmesi için ızgara, ayna tutucuyla sabitlenir.

Lazerler akıma ve sıcaklığa karşı hassaslardır. Bu nedenle; akımın ve sıcaklığın sabit tutulacağı bir güç kaynağına ihtiyaç vardır.

Öncelikle lazer ve kırınım ızgarasının düzeneğe yerleşimi yapılmalıdır. Bu konuda Littrow düzeneği örnek alınabilir (Şekil 3.1.a). Ancak Littrow düzeneğinde akortlama için kırınım ızgarasının yön değiştirmesi, sistemde sürekli ayarlamalara neden olmaktadır. Haliyle bu da, deneyin hassasiyetine zarar vermekte ve zaman kaybına yol açmaktadır. Littman-Metcalf düzeneği ile bu durum düzeltilmiştir (Şekil 3.1.b). Burada da yerleştirilen düzenek sistemin hacmini ve maliyeti olumsuz yönde etkilemiştir.

Tezin amacı; saydam kırınım ızgaralarının harici optik salıncılı lazer sisteminde kullanılabilirliğini test etmektir. Littrow düzeneğiyle kurulacak olan sistem üzerine yansıtıcı kırınım ızgarası yerine, Şekil 3.1.c'de gösterildiği gibi saydam kırınım ızgarası yerleştirilecektir. Işın kalitesine ilişkin frekans kararlılığı ve akortlanabilirliği test edilecektir.

Sistemin oluşumuna bakıldığında;

- 1) Diyota uygulanan akım; güç kaynağı tarafından alınır. Akım değişimi lazer ışığında frekans değişikliğine neden olur.
- 2) Diyota uygulanan sıcaklık; diyot üreticisinin belirlediği sıcaklık aralığında çalışılır. Diyottun sıcaklık değişimi, frekans değişimine neden olacağı için sabit bir sıcaklık değeri alınmalıdır.
- 3) Kırınım denklemi eşitlik 3.1'de verilmiştir.

$$m\lambda = d(\sin\theta_D + \sin\theta_I) \quad (3.1)$$

Burada; m , kırınım mertebesi; λ , gelen aydınlanma ışınının dalga boyu; θ_D , aydınlatma ışınının m inci mertebeden kırınım açısı; θ_I , aydınlatma ışınının gelme açısıdır.

Özel bir durum olarak, kırınım açısının 1 inci mertebesi ($\sin\theta_D$) gelme açısına ($\sin\theta_i$) eşit olduğunda, eşitlik 3.2 elde edilir.

$$\lambda = 2d\sin\theta_i \quad (3.2)$$

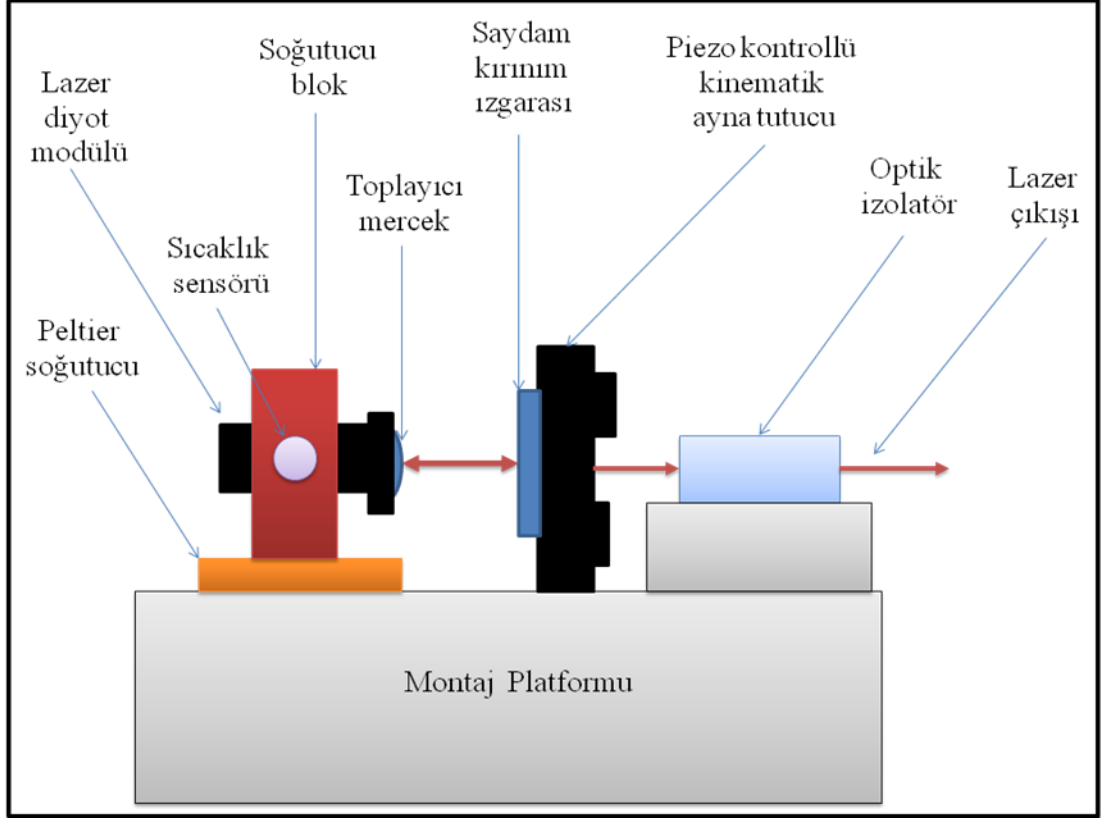
Buna *Bragg Yasası* denilmektedir. Bu denkleme göre kırınım ızgarasının açısı değiştirilerek, istenilen akortlama sağlanır.

Burada; θ_i , ışının gelme açısını; λ , lazer diyotunun belirli bir sıcaklık ve akımdaki dalga boyunu vermektedir. Kırınım periyodu d ise kırınım ızgarası üzerinde her bir milimetredeki ızgaranın sayısını vermektedir. Kullandığımız 658 nm lazer diyotu ve kırınım periyodu 1200 çizgi/mm olan kırınım ızgarasına karşılık, $\theta=23.25^\circ$ açısı bulunmuştur.

Kullanılan saydam kırınım ızgarası ile HOSDL sistemi akortlanmıştır ve ışının yer değiştirmesi önlenmiştir. Bildiği kadarıyla, 658 nm’de saydam kırınım ızgarası ile yapılmış ve kullanılabilir bir HOSDL sistemi henüz yoktur.

3.1.1. Sistemin Bileşenleri

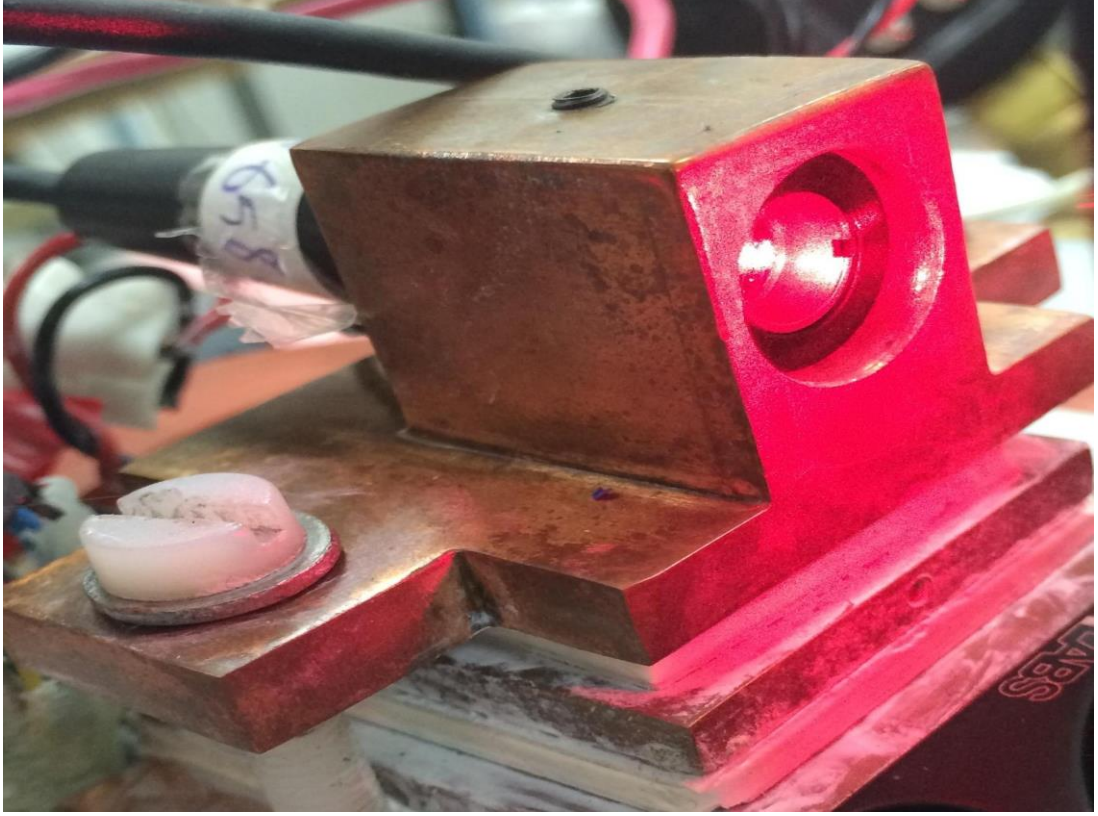
Saydam kırınım ızgaralı harici optik salıncılı diyot lazer sisteminin bölümleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Lazer kafası, geri besleme bölümü, optik izolatör ve montaj kısımlarından oluşmaktadır.



Şekil 3.2. Harici optik salımcılı diyot lazer sisteminin şematik gösterimi.

3.1.1.1. Lazer kafası

50x50x25 mm³ ölçüsünde, bakırdan yapılmış bloktur. Üzerine lazer diyeti yerleştirilir. Bu diyetin yüksek sıcaklıklarda hasar almaması için altına 30x30 mm²'lik termoelektrik soğutucu (TEC) yerleştirilir.



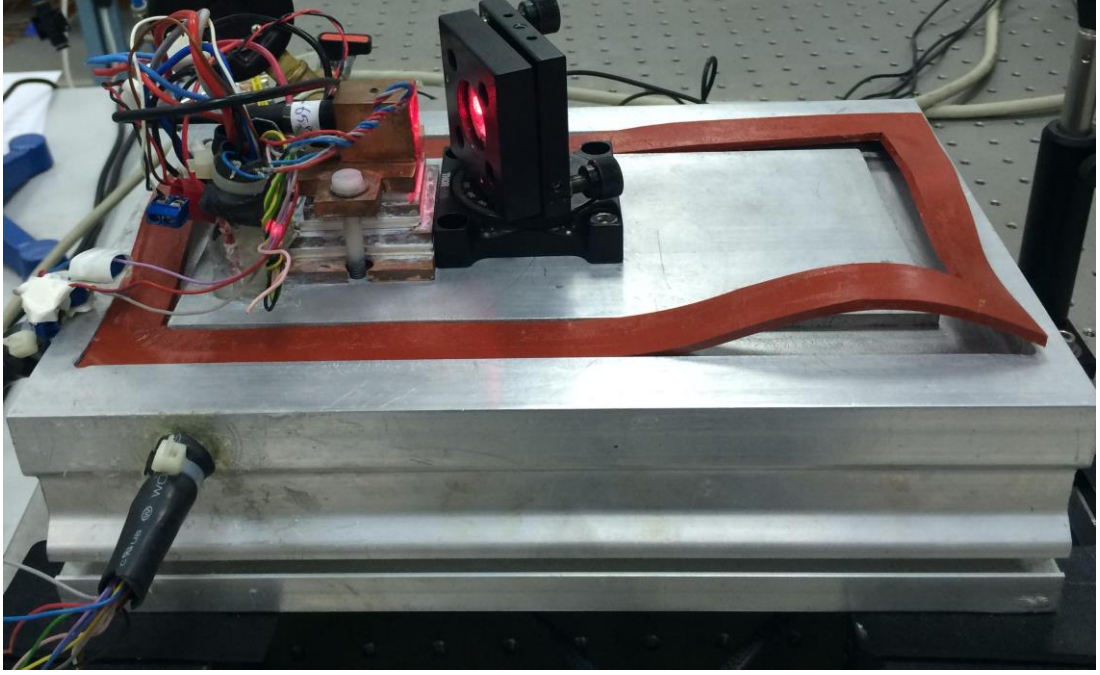
Şekil 3.3. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarında tasarlanan lazer kafasının fotoğrafı.

3.1.1.2. Optik izolatör

Kullanacağımız lazer sistemi geri beslemeye duyarlı olduğundan, istenmeyen ışınların içeri girmesini engeller. Çıkış ışınının bozulması ihtimaline karşı bu önlem alınmalıdır.

3.1.1.3. Montaj platformu

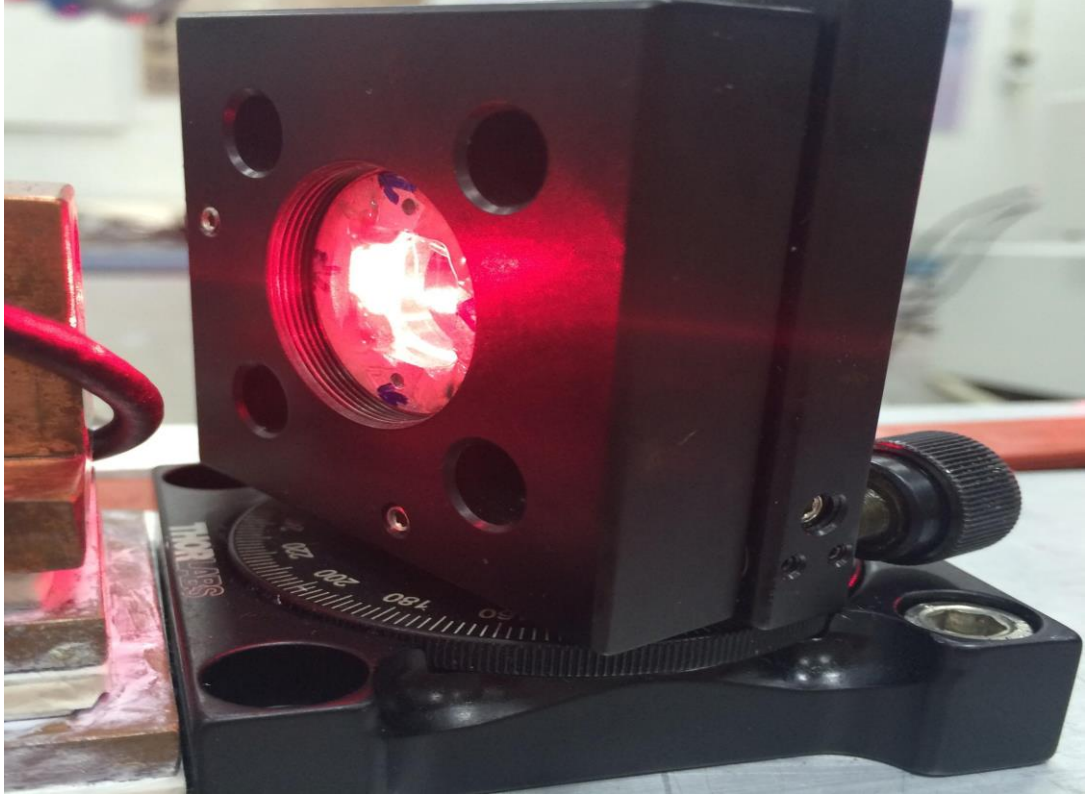
Lazer sisteminin tüm elemanlarıyla birlikte sabitleneceği platformdur. 150x200x250 mm³ ölçüsünde, alüminyum bloktur. TEC'in çalışması için gerekli ısı havuzudur. Sıcaklık kararlılığını sağlar. Lazerin sıcaklık kararlılığını sağlayan TEC'in sistemden aldığı ısıyı atmasına yardımcı olan ısı havuzudur.



Şekil 3.4. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarında kullanılan montaj platformunun fotoğrafı.

3.1.1.4. Geri besleme bölümü

Saydam kırınım ızgarası ve 25.4 mm çaplı optik malzemedendir. Optik tutucu 3 tür (ileri-geri, aşağı-yukarı ve sağ-sol) hareket yapabilir ve hassas ayarda kullanılır.

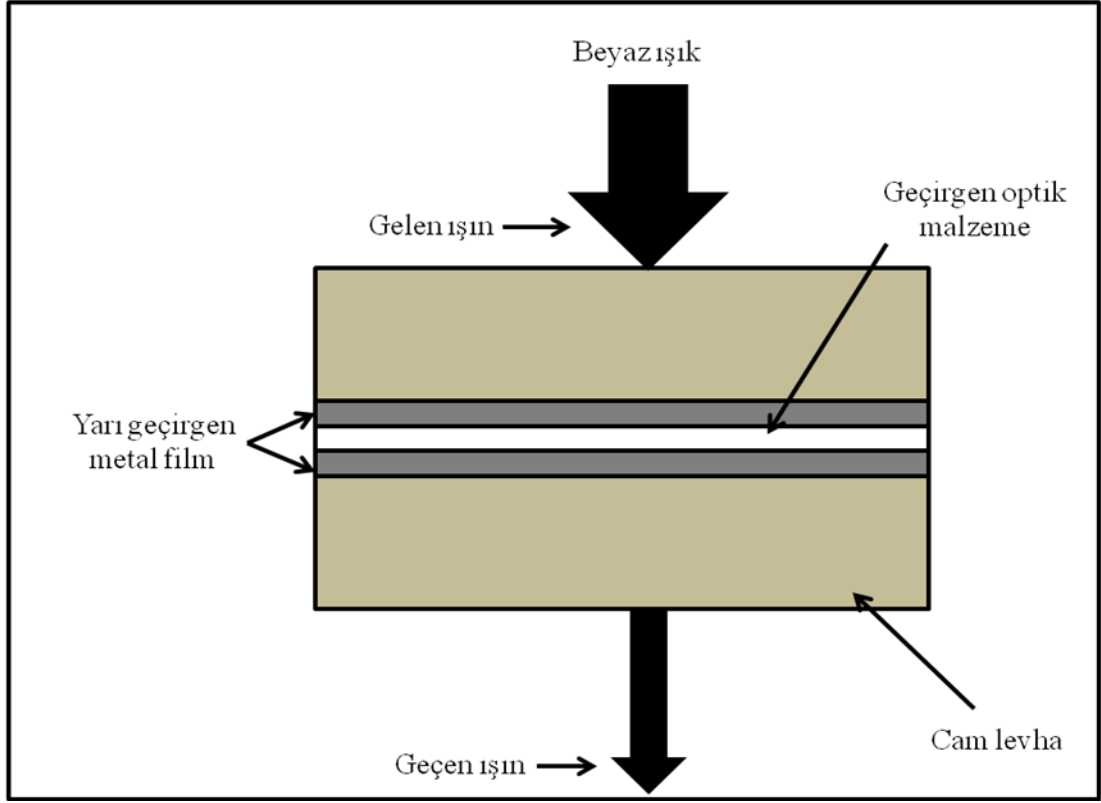


Şekil 3.5. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarı'nda kurulan HOSDL sisteminde geri besleme elemanı olarak kullanılan saydam kırınım ızgarası (Thorlabs GT13-12 Vis. Trans. Grating) ve PZT Kinematik ayna tutucu (Thorlabs KC1-PZ).

3.1.2. Frekans Seçici Elemanlar

Lazerlerden elde edilen ışığın, istenilen tek bir dalga boyu içeren özellikte olması için kullanılan malzemelere *frekans seçici eleman* denir. Bu elemanlar, lazer cihazın seçiciliğini ve hassasiyetini arttırmırlar. Lazer cihazının ürettiği ışığın dalga boyu azaldıkça, frekansı artar ve daha güçlü lazer ışığı elde edilir. Bu elemanlar, lazerlerde, haberleşmede, mikrodalga fırınlarda ve anten sistemlerinde kullanılabilirler. Kırınım ızgaraları ve prizmalar, frekans seçici eleman olarak kullanılırlar [39].

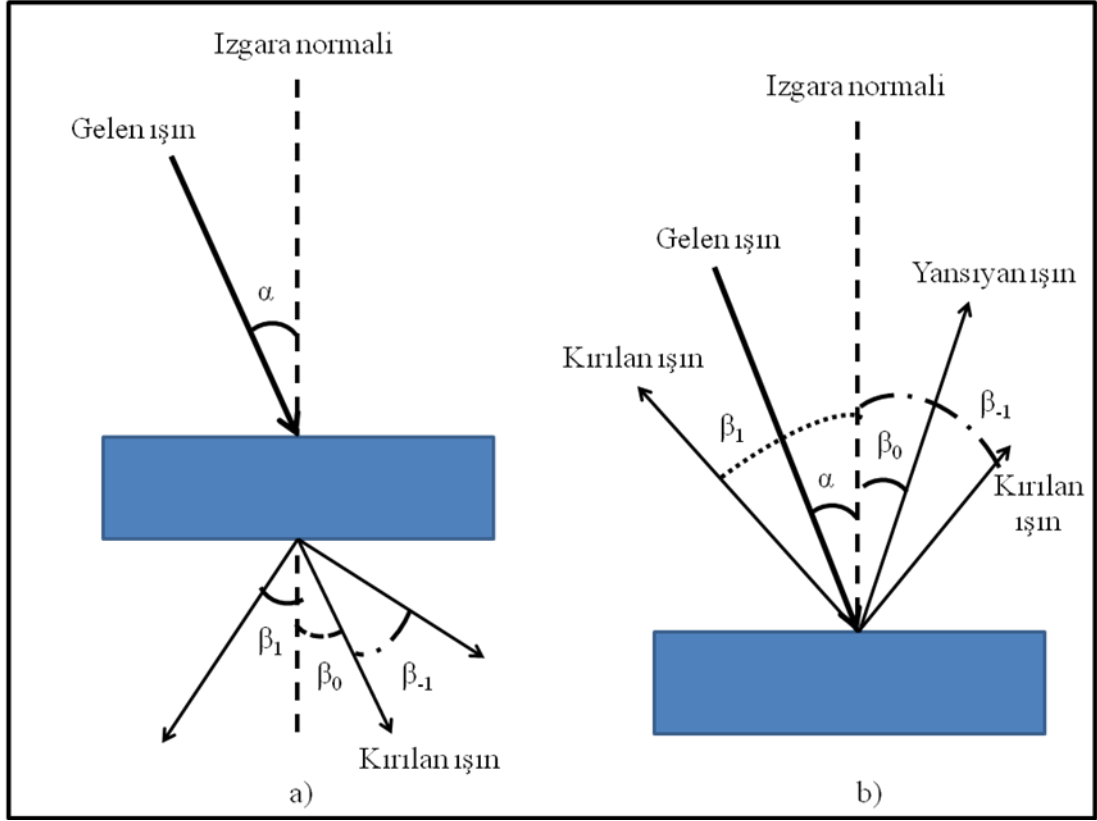
Kırınım ızgaraları 200 nm ile 14000 nm dalga boyu aralığında çalışırlar. Çok dar bantlı ışın elde etmek için kullanılırlar.



Şekil 3.6. Beyaz ışığın kırınım ızgarasıyla etkileşimi.

Kırınım ızgarasında saydam bir dielektrik madde bulunur. Bu dielektrik madde genellikle kalsiyum florür (CaF_2) ya da magnezyum florür (MgF_2) gibi malzemelerden yapılır. Şekil 3.6’da gösterildiği gibi bu dielektrik malzeme, yarı geçirgen iki metal film arasına sıkıştırılır. Işığın dalga boyunu, dielektrik malzeme tespit eder. Bundan dolayı, bu malzemenin kalınlığının çok iyi ayarlanması gerekir. Beyaz bir ışın demeti, oluşturulan sisteme dik şekilde gönderilir. Işın ilk metal yüzeye çarptığında bir kısmı geçer, diğer kısmı geri yansır. Daha sonra kalan ışın, ikinci metal yüzeyden geçer. İlk duruma göre daha dar bantlı ışık elde edilmiş olur [40].

Kırınım ızgarası kullanılarak, doğrusal düzlem boyunca ışın yayan optik cihazlar elde edilebilir. Ancak dezavantajları da vardır. Çok miktarda ışığın saçılmasına sebep olurlar. Gereksiz seviyelerde ışın üretirler. Bu sorunların giderilmesi için ızgara yüzeyi parlatılabilir ya da prizmalarla birlikte kullanılabilirler.

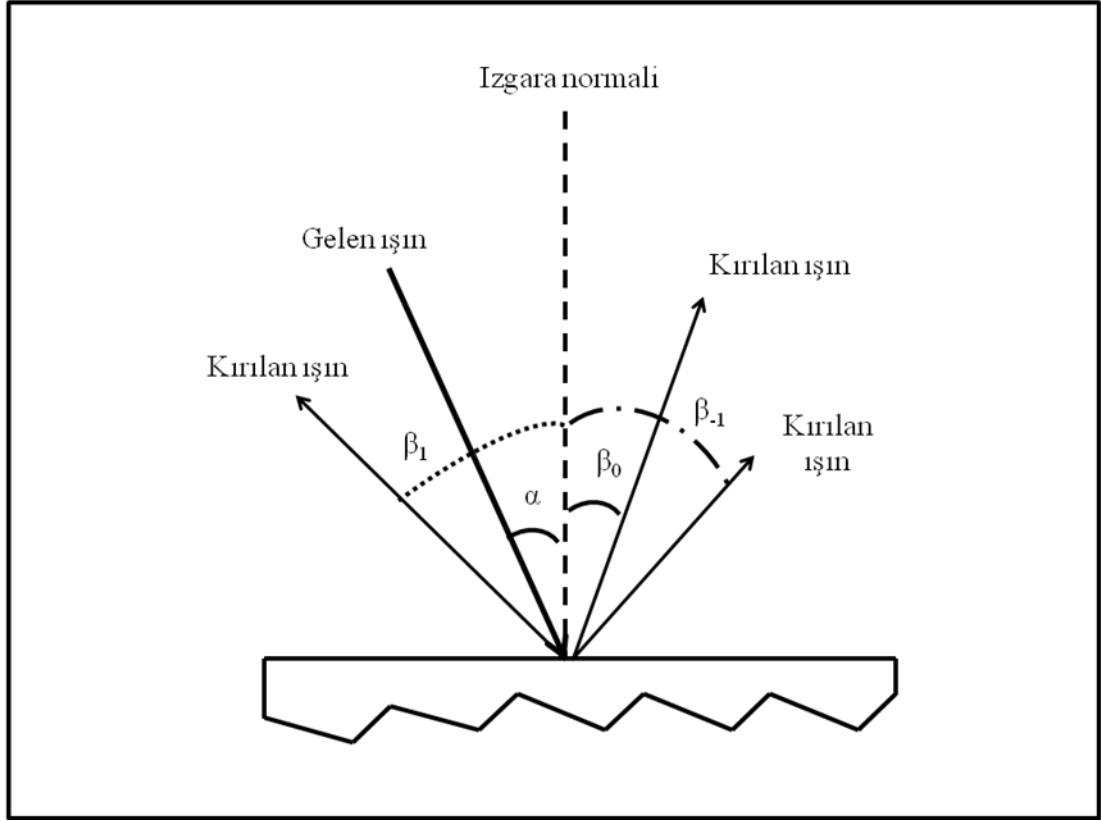


Şekil 3.7. Kırınım ızgara çeşitleri; a) Saydam kırınım ızgarası, b) Yansıtıcılı kırınım ızgarası.

Genel olarak iki tip kırınım ızgarası vardır. Bunlar; yansıtıcılı kırınım ızgarası ve saydam kırınım ızgarasıdır. Şekil 3.7'de kırınım ızgarasının çeşitleri gösterilmiştir. Şekil 3.7.a'da saydam kırınım ızgarası gösterilmiştir. Bu tip ızgara, gelen ışığı ızgara yüzeyinden geçirir. Şekil 3.7.b'de yansıtıcılı kırınım ızgarası gösterilmiştir. Bu tip ızgara ışığı geçirmez, adından da anlaşılacağı gibi yansır.

3.1.2.1. Yansıtıcılı kırınım ızgarası

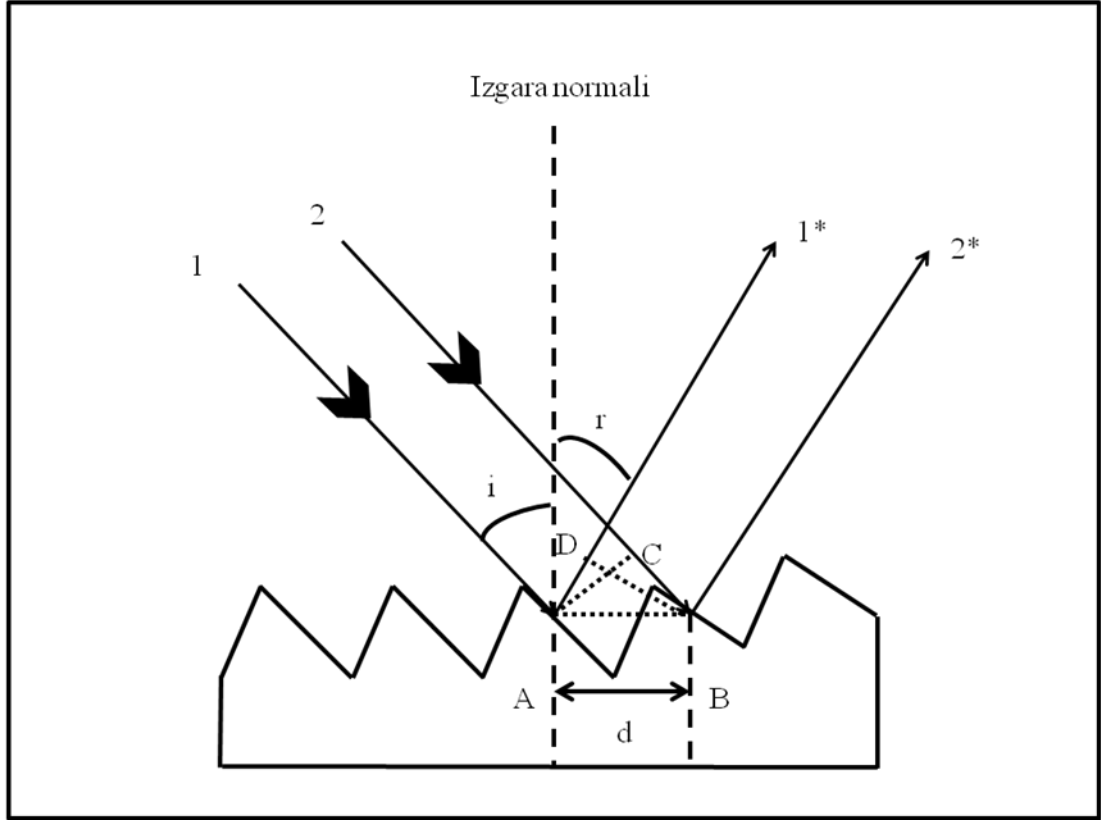
Bu tip kırınım ızgaraları kızılötesi (infrared) bölgelerde yüksek oranda dağıtıcı olduklarından, prizmalara oranla çok fazla tercih edilirler. Yansıtıcılı kırınım ızgarası kullanıldığında, ışığın enerji kaybı çok az olur ve kolaylıkla ayrılma sağlanabilir. Suyu dayanıklı bir malzemedir. Üzeri genellikle alüminyum kaplanır.



Şekil 3.8. Yansıtıcılı kırınım ızgarasının şeması.

Şekil 3.8’de yansıtıcılı kırınım ızgarasının şeması gösterilmiştir. Gelen ışın kırınım ızgarasının üzerine düştüğünde, kırılmalara uğrar. Üç tip kırılan ışın meydana gelir. Bu ışınlar normal ile β_0 , β_1 ve β_{-1} açıları yaparlar. Gelen ışının normal ile yaptığı açı da α kadardır.

Yansıtıcılı kırınım ızgaraları, metal bir yüzeye düzgün paralel oyuklar çizilerek elde edilir. Bir milimetre başına genellikle 200 ile 3000 arasında çizgi düşmektedir. Ama yaygın olarak kullanılan yansıtıcılı kırınım ızgaraları 1200 çizgi/mm veya 1400 çizgi/mm’dir. Geniş yüzeyler ışığı yansıtırken, dar yüzeyler etkisiz kalmıştır. İzgaranın bu şekilde yapılma sebebi; yüksek verimde kırılma sağlamaktır.



Şekil 3.9. Üzerine ışık düşen yansıtıcılı kırınım ızgarasının iç yapısı.

Yansıtıcılı kırınım ızgarasının iç yapısı Şekil 3.9’da verilmiştir. 1 ve 2 nolu ışınlar birbirine paralel ve i açısıyla gelen, tek renkli ışınlardır ve girişim oluştururlar. Girişimin oluşabilmesi için ışınlar arası uzaklık farkının, gelen ışığın dalga boyunun katları kadar olması gerekir. 1* ve 2* nolu ışınlar r açısıyla kırılmaya uğrayan, birbirine paralel ışınlardır. 2 nolu ışın yapısı gereği 1 nolu ışından daha uzun bir yol izler.

Yapıcı girişimin olma koşulu, eşitlik 3.3’de verilmiştir.

$$n\lambda = |CB| - |AD| \quad (3.3)$$

$$|CB| = dsini \quad (3.4)$$

$$|AD| = -dsinr \quad (3.5)$$

Bu eşitlikler düzenlendiğinde, eşitlik 3.6 elde edilir.

$$n\lambda = dsini + dsinr \quad (3.6)$$

Burada; n , kırınım derecesi (tam sayı); λ , dalga boyu; i gelen ışın ile normal arasındaki açı; d , yapılar arasındaki mesafedir.

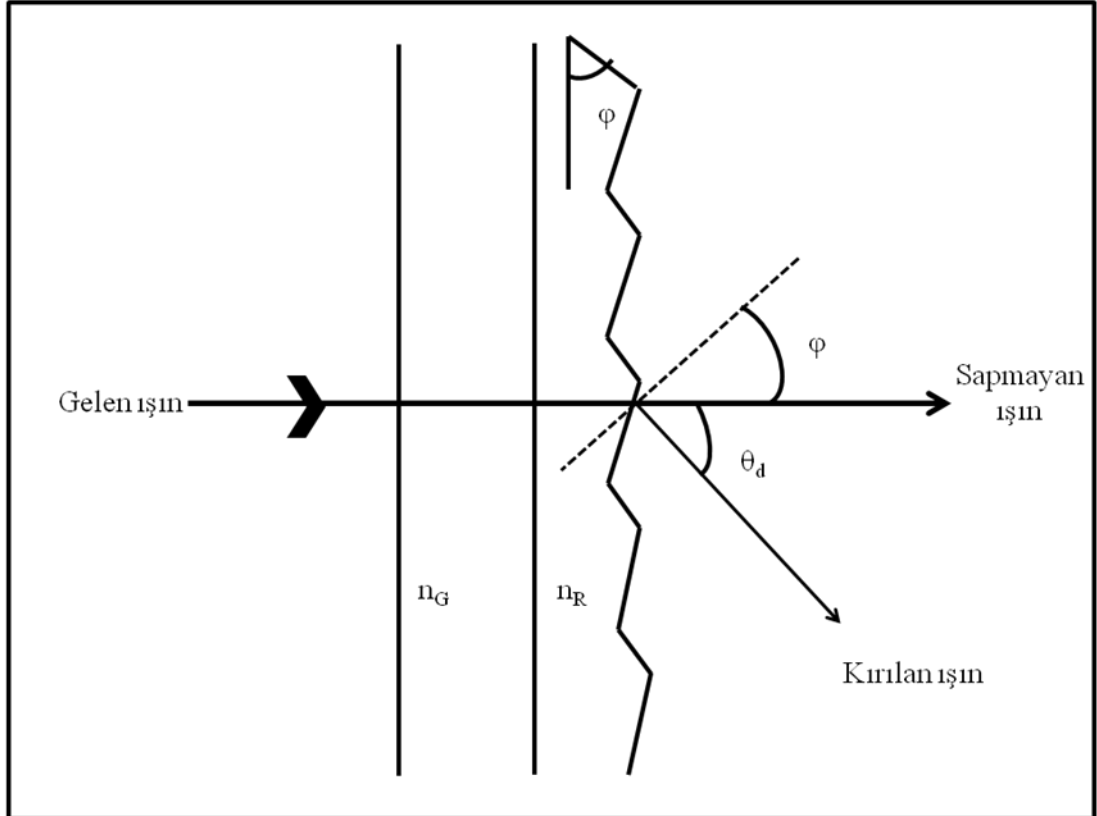
3.1.2.2. Saydam kırınım ızgarası

Saydam kırınım ızgarasının yüzeyinde çok sayıda birbirine paralel girinti çıkıntılar vardır. Bu ızgaranın maliyeti oldukça yüksektir. Cam ya da saydam malzemenin üzerine yapılan kimyasal kaplama, büyük bir titizlik gerektirir.

Saydam kırınım ızgarasının Bragg kırınım denklemi eşitlik 3.7'de verilmiştir.

$$m\lambda = d\sin\theta_d \quad (3.7)$$

Burada; m , kırınım mertebesi; d , yarık aralığı; θ_d , kırınım açısıdır.



Şekil 3.10. Saydam kırınım ızgarasının şematik gösterimi.

Saydam kırınım ızgarasının şematik gösterimi Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Gelen ışın saydam kırınım ızgarasına düşürüldüğünde, ızgara normali ile sapmayan ışının arasındaki açı φ açısı ile tanımlanmıştır. φ açısı, aynı zamanda ızgara açısı olarak da bilinir. Kırınım ızgarasının kırınım sabitine n_R denilmiştir. Prizmanın kırınım sabitine n_G denilmiştir. θ_d , sapmayan ışın ile kırılan ışın arasındaki açıdır.

Snell yasası saydam kırınım ızgarasına uygulandığında, eşitlik 3.8 elde edilir.

$$n_R \sin \varphi = \sin(\varphi + \theta_B) = \sin \varphi \cos \theta_B + \cos \varphi \sin \theta_B \quad (3.8)$$

Burada; θ_B , kırınımın yöndeş açısıdır.

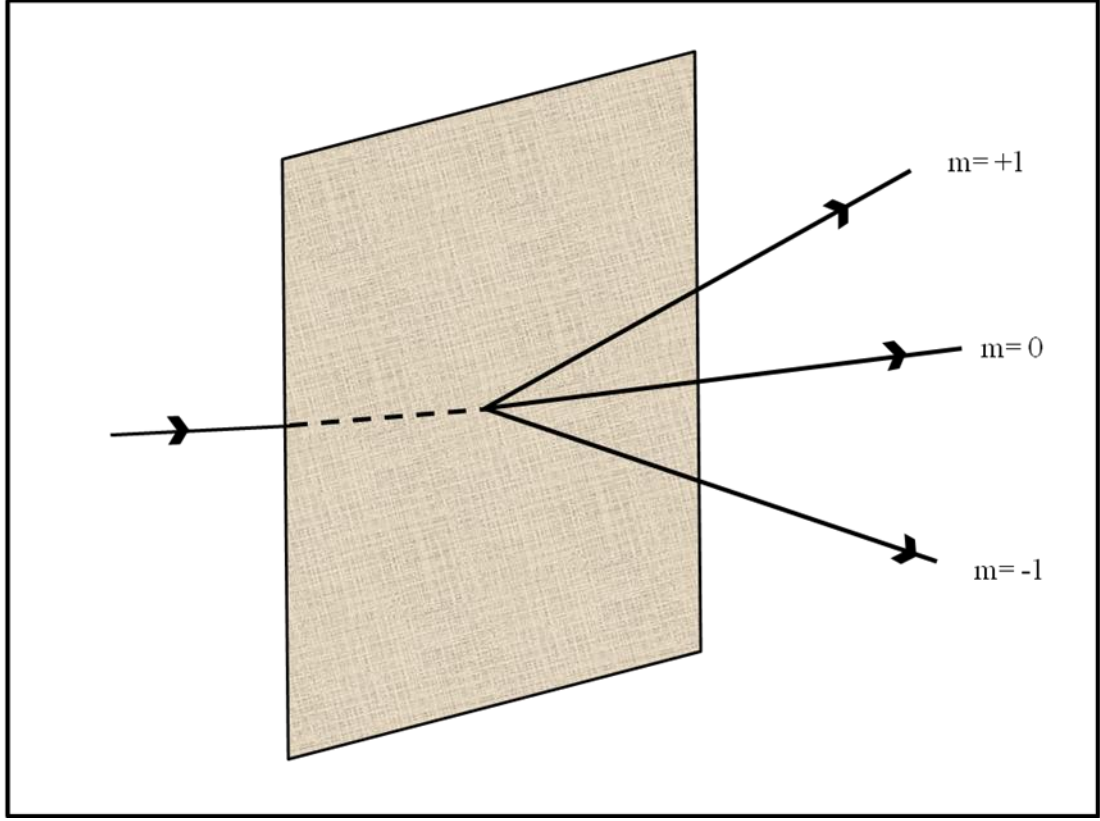
$$n_R \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \varphi \cos \theta_B = \sin \theta_B \quad (3.9)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \theta_B}{n_R - \cos \theta_B} \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.7'deki λ değeri, gelen ışığın dalga boyuna eşittir. Eşitlik 3.7 düzenlendiğinde, eşitlik 3.11 elde edilir.

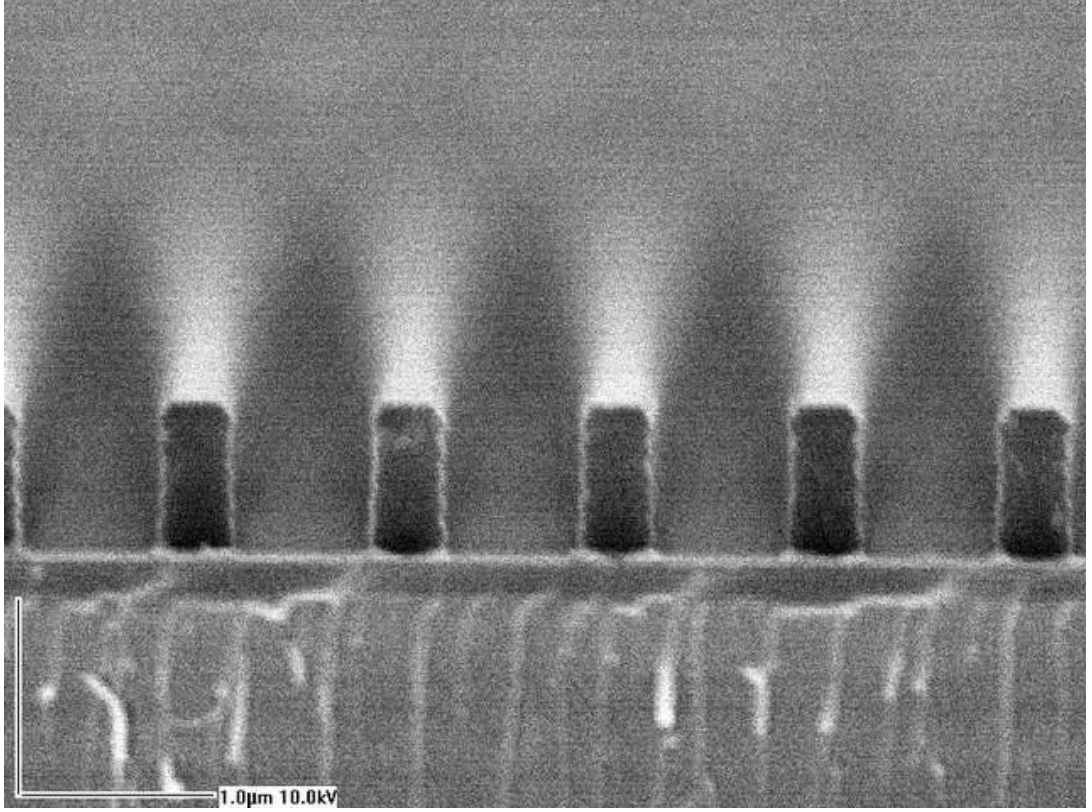
$$\lambda_B = d \operatorname{tg} \varphi \frac{n_R - \sqrt{1 + (1 - n_R^2) \operatorname{tg}^2 \varphi}}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi} \quad (3.11)$$

Burada; λ_B , parlak ışığın dalga boyudur.



Şekil 3.11. Saydam kırınım ızgarasına düşen ışıktan çıkan ışınların gösterimi.

Saydam kırınım ızgarasının üzerine düşen ışığın gösterimi Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Bu ızgaranın üzerine düşen ışınlar, m ile nitelendirilmiştir. Burada; m , kırınım mertebesini göstermektedir. Saydam kırınım ızgarası, ışığı üçe böler. $m=+1$ ile gösterilen ışık, en parlak ışık olarak adlandırılır (first order). $m=0$ ile gösterilen ışık, kırılmaya uğramadan direk geçen ışığı temsil eder (zero order). $m=-1$ ile gösterilen ışık ise kırılmaya uğrayan ışığı temsil eder.



Şekil 3.12. SEM cihazında görüntülenen saydam kırınım ızgarası örneği.

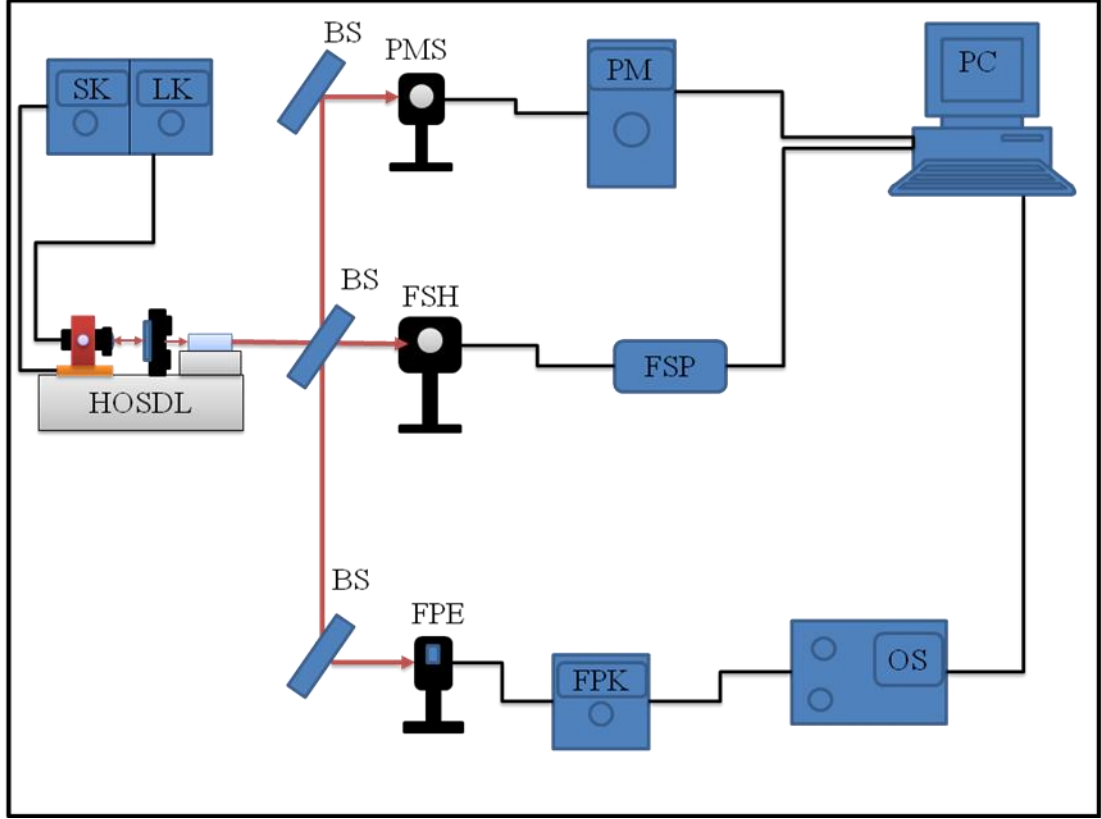
Silisyum oksit (SiO_2) kaplı saydam kırınım ızgarası, Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Kullanım alanlarına göre bir milimetredeki çizgi sayıları değişebilir. Örneğin; ultraviyole ya da görünür bölgede çalışıldığında 2000 çizgi/mm ile 6000 çizgi/mm yeterli iken, kızılötesi bölgesinde çalışıldığında 20 çizgi/mm ile 30 çizgi/mm’lik ızgaralar yeterli olmaktadır.

3.1.3. Sistemin Kurulması ve Çalıştırılması

Lazer diyotu ve mercek, lazer kafasındaki tüp içine yerleştirilmiştir. Bu lazer kafasının altına TEC koyulmuştur. Diyot lazer ışığı, akım vasıtasıyla denenmiş ve ışın paralel hale getirilmiştir. Burada amaç; lazer ışığının dağılmadan gitmesidir. Gerekli ayarlamalar yapılmıştır. Saydam kırınım ızgarası, optik tutucu üzerine yerleştirilmiştir. Diyot akımı, geri besleme için ayarlanmıştır.

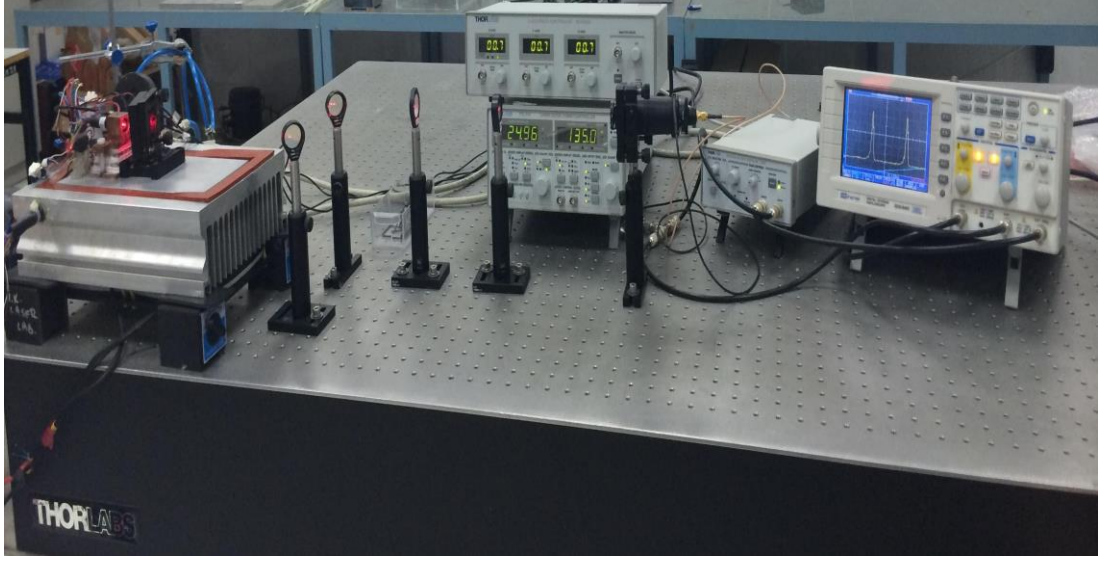
Kırınım ızgarasından yansıyan ışın; toplayıcı tüp içerisinden geçerek, geri yansımış ve bu sistemde yeni bir ışık görülmüştür. Hassas ayarlama yapılmış ve daha

şiddetli bir ışık elde edilmiştir. Ayrıca, kırınım ızgarasının açısı değiştirilmiş ve farklı dalga boylarında ışık elde edilmiştir. Daha sonra ölçüm işlemine geçilmiştir.



Şekil 3.13. Harici Optik Salıncılı Diyot Lazer Sisteminde (HOSDL) alınan ölçüm düzeneği.

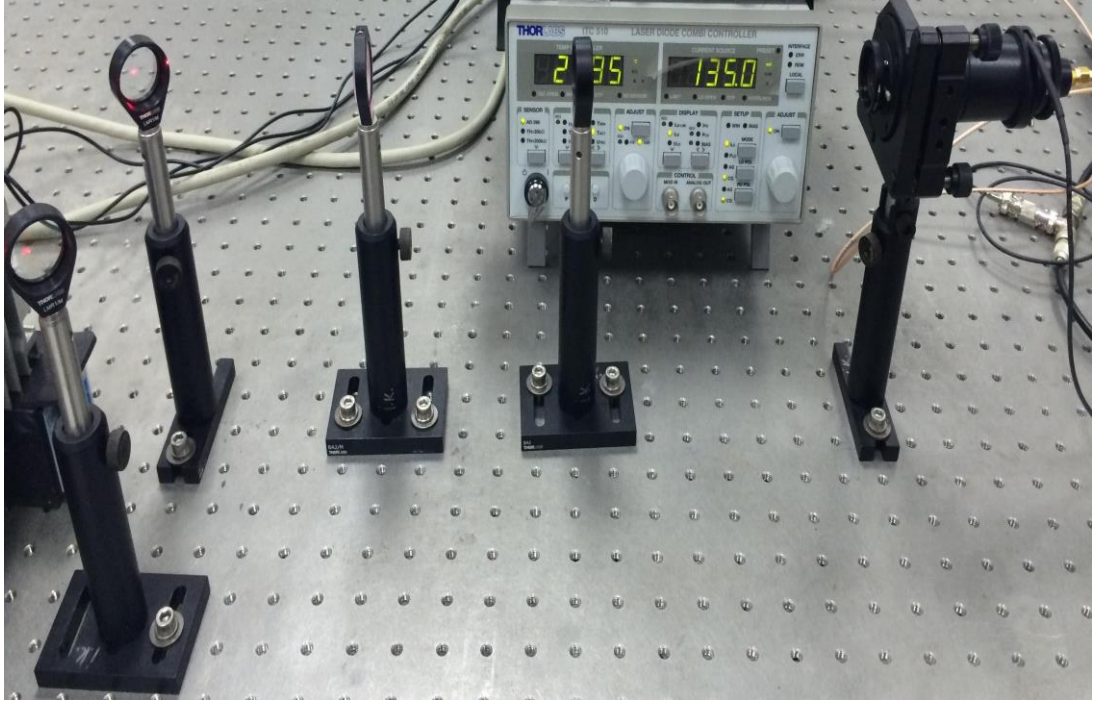
Burada; SK, sıcaklık kontrol cihazı; LK, diyot lazer akım cihazı; PMS, güç ölçer sensörü; PM, güç ölçer; FSH, fiber başlık; FSP, fiber spektrometre; FPK, Fabri-Perot Etalon kontrol cihazı; FPE, Fabri Perot Etalon sensörü, OS, osiloskop; PC, masaüstü bilgisayardır.



Şekil 3.14. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarı'nda kurulan HOSDL sistemi ile frekans bant genişliği ölçümü alınan deney düzeneği.

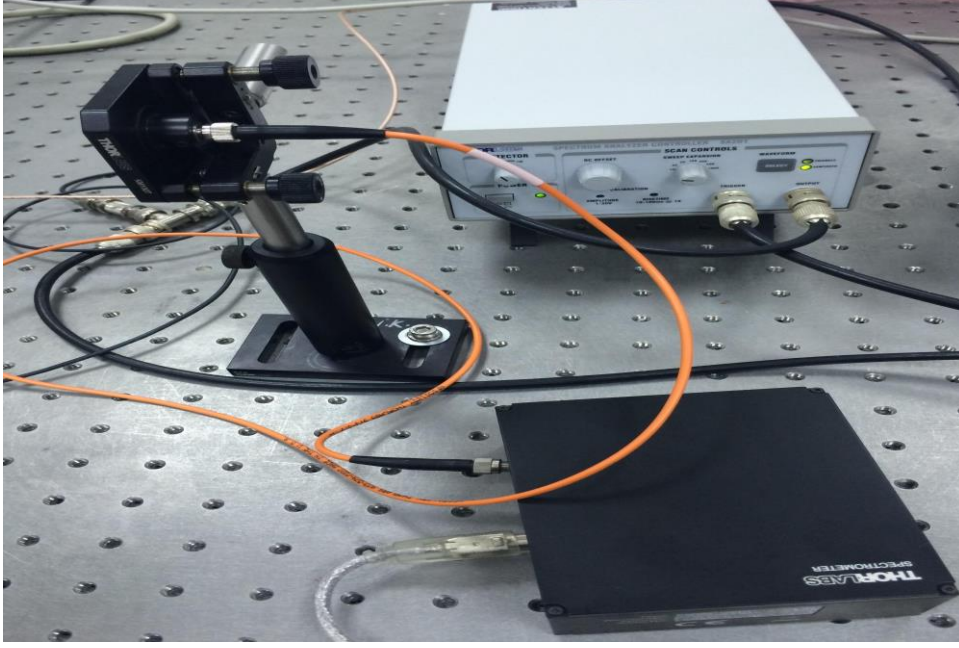


Şekil 3.15. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarı'nda kurulan HOSDL sisteminde kullanılan Piezo güç kaynağı (Thorlabs MDT693A) ile lazer kafasının akım ve sıcaklık kontrol cihazı (Thorlabs ITC510).

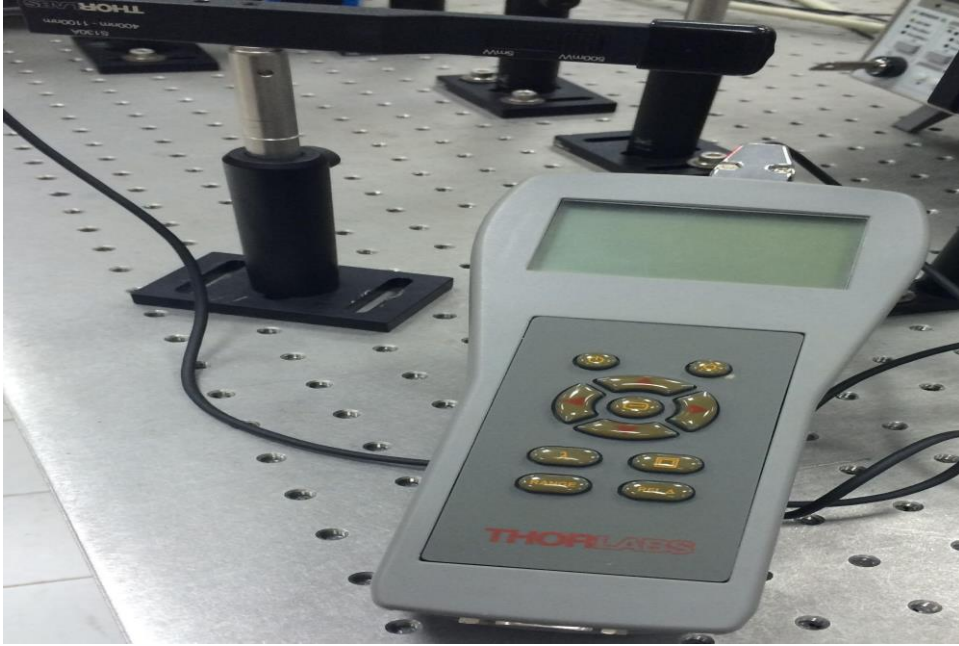


Şekil 3.16. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarı'nda kurulan HOSDL sisteminde kullanılan optik bölüm.

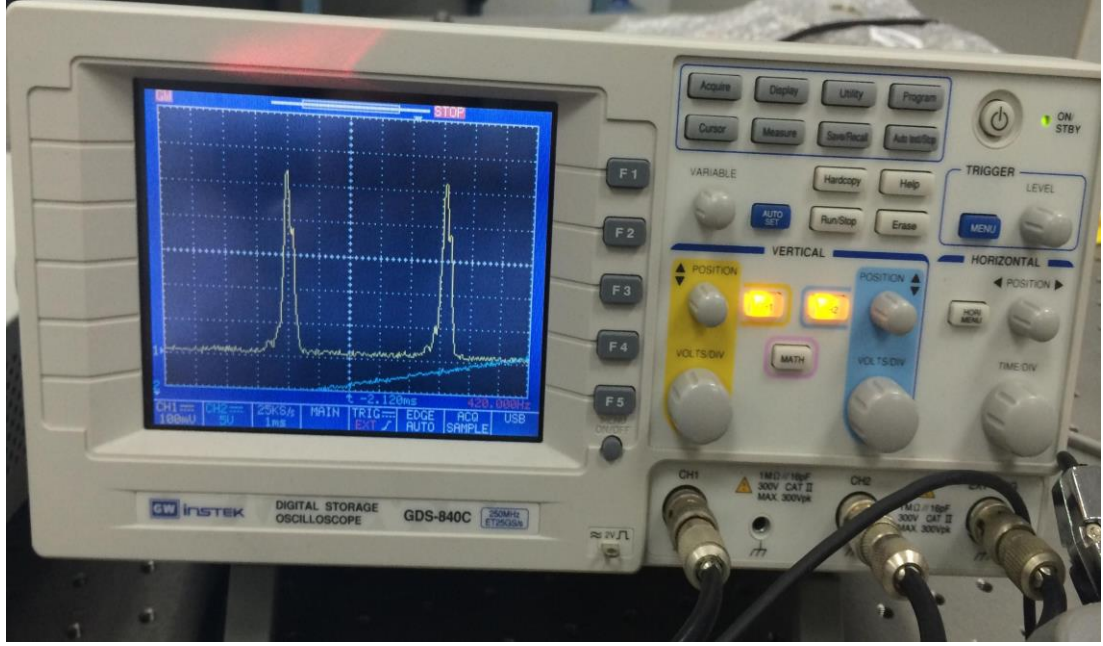
Deney düzeneğinin optik kısmı Şekil 3.16'da verilmiştir. Bu optik bölümde; birbirine 45° 'lik açı ile konulan iki ayna, ikinci ayanın sonuna eklenen ve lazer ışığını büyüten bir mercek (Thorlabs LC 1715), büyüyen ışığı kutuplayan bir mercek (Thorlabs LA 1461) ve lazer ışığının frekans bant genişliğini ölçmek için kullanılan Fabry Perot Etalon bulunmaktadır.



Şekil 3.17. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarı'nda kurulan HOSDL sisteminde dalga boyu ölçümü için kullanılan fiber spektrometre cihazı (Thorlabs SPD-USB).



Şekil 3.18. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarı'nda kurulan HOSDL sisteminde lazer ışığının gücünü ölçmek için kullanılan güç ölçer (Thorlabs PM100).



Şekil 3.19. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarı'nda kurulan HOSDL sisteminde Fabry Perot Etalonun bağlandığı osiloskop (Goodwill GDS 840S).

Lazer Sisteminin Parametreleri

- 1) Lazer Diyot Akımı: Uygulanan akım, sistemin sıcaklığını değiştirir. Akım değişimi, eşitlik 3.12 ile verilmiştir.

$$IR^2 = mc\Delta T \quad (3.12)$$

Burada; I , akımdır; R , lazer direncidir; m , küttedir ve c , ısı sığasıdır.

- 2) Lazer Diyotu Çalışma Sıcaklığı: Lazer ışığının dalga boyunun değiştirilmesi için belli bir sıcaklık aralığı gereklidir. Soğutma sistemi ile bu durum kontrol altına alınabilir.
- 3) Kırınım Izgarası Açısı: 1200 çizgi/mm olarak saydam kırınım ızgarası seçilmiştir. Paralel olarak elde edilen ışık, % 30 geri besleme ile ve % 70 normal bölüm ile sağlanmıştır. Optik tutucuya monte edilen ızgara, ışık için hassas ayar yapılarak, kullanılmıştır.

- 4) Akortlama Parametreleri: Sıcaklık ve akım akortlama parametreleridir. Sıcaklık lazer ışığının salınımını değiştirir. Ayrıca dalga boyunu etkiler. Bundan dolayı sıcaklık kontrolü lazer diyotu için önemlidir.

1. Deney Adı: Frekans Seçici Elemanın Açısını Değiştirerek Dalga Boyu Tarama Aralığının Tespiti

Başlama Koşulları:

Oda sıcaklığı: 25 °C

Ortamın nemi: %24

Lazer diyotunun sıcaklığı: 25 °C

Platform sıcaklığı: 25 °C

Diyot lazer cinsi : HL6535MG – 658 nm

Diyot lazere verilen akım: 135 mA

Kullanılan frekans seçici eleman: Thorlabs GT13-12; Vis. Trans. Grating; 1200 çizgi/mm; 12,7 mm x12,7 mm

Deneyin Yapılışı: Öncelikle lazer kontrol cihazı açılarak, üst peltiere (TEC1-7105) akım verilmiştir. Lazer kafasının sıcaklığının 25 °C'de sabitlenmesi sağlanmıştır. Ayrıca, lazer kontrol cihazıyla lazer diyotuna 135 mA akım verilmiştir. Diyot lazer önüne frekans seçici eleman konulmuştur. Bragg kırınım denklemi kullanılarak, frekans seçici elemanın açısı hesaplanmıştır. Hesaplanan bu açının etrafında ± 1 °C oynanarak, dalga boyu tarama aralığı gözlenmiştir.

2. Deney Adı: Harici Optik Salıncılı Diyot Lazer Sistemiyle Bant Genişliği Ölçümü

Başlama Koşulları:

Oda sıcaklığı: 25 °C

Ortamın nemi: %24

Lazer diyotunun sıcaklığı: 25 °C

Platform sıcaklığı: 25 °C

Diyot lazer cinsi : Thorlabs HL6535MG – 658 nm

Diyot lazere verilen akım: 135 mA

Kullanılan frekans seçici eleman: Thorlabs GT13-12; Vis. Trans. Grating; 1200 çizgi/mm; 12,7 mm x12,7 mm

Deneyin Yapılışı: Kurulan HOSDL sisteminde; lazer diyotu akım kontrol cihazına bağlanmıştır. Sıcaklık sabitliğinin sağlanması için lazer kafasının altına konulan TEC sıcaklık kontrol cihazına bağlanmıştır. 25 °C oda sıcaklığında ve % 24 bağıl nemde çalışılmıştır. Lazer diyotu 135 mA'de (tam güçte) çalıştırılmıştır. Yapılan bu deneyde Thorlabs GT13-12 Vis. Trans. Grating ızgarası kullanılmıştır. Izgaradan çıkan lazer ışığı 45°'lik açıyla ayna yüzeyine düşürülmüştür. 45°'lik ikinci bir aynaya düşürülerek, ışığın taşınması sağlanmıştır. Bunun yapılma sebebi; ışığın kayıplara uğramadan, tamamının deneyde kullanılmasını sağlamaktır. Thorlabs LC1715 merceğine gelen ışık, büyütülerek, Thorlabs LA1461 merceğine iletilmiştir. Burada kutuplanan lazer ışın demeti, Thorlabs LA1484 merceğine gönderilmiştir. Bu mercekte odaklanan lazer ışın demeti, Fabry Perot Etalon'a gönderilmiştir. Fabry Perot Etalon içerisinde iki ayna bulunur. Lazer ışın demeti Fabry Perot Etalon' un ilk aynasına çarptığında, iki ışın demetine bölünür. Bu iki ışın demeti ikinci aynaya çarpıp, geri döndüklerinde ilk aynada girişim deseni oluştururlar. Böylece lazer ışın demeti kuvvetlenmiş olur. Fabry Perot Etalondan çıkan lazer ışın demeti ilk olarak, güç ölçer cihazına bağlanıp, lazer ışığının çıkış gücü hesaplanmıştır. Daha sonra Fabry Perot Etalon osiloskop yardımıyla bilgisayara bağlanarak, bant genişliği için veriler alınmıştır.

Tablo 3.1. Kurulan lazer sisteminde kullanılan aletler ve özellikleri.

Adı / Modeli	Tezde Kullanım Amacı	Teknik Bilgi
Thorlabs HL6535MG lazer diyotu	Kurulan sistemde yer alan diyot lazerdir.	658 nm dalga boyuna sahip, 55 mA min. akım, 135 mA max. akım, çalışabileceği en yüksek operasyon sıcaklığı 85 °C.
Thorlabs GT13-12 Vis. Trans. Grating	Frekans seçici eleman olarak kullanılmıştır.	1200 çizgi/mm, 12,7 mm x12,7 mm ölçüsünde.
Optik Masa/ Thorlabs PTM51508(4 adet ayakPTL503)	Deney düzeneklerinin montajında kullanılmıştır.	2000x1250x210 mm ³ , yüksek yoğunluklu petek çekirdekli çift plaka, titreşime karşı duyarlı.
Akım ve Sıcaklık Kontrol Cihazı/ Thorlabs ITC510	Diyot Lazer Sistemi için akım ve sıcaklık kontrolü için kullanılmıştır.	Akım aralığı 0...-/ + 1A, operasyon sıcaklığı 0 °C ile 40 °C arasında, ebatları 220x120x377 mm ³ .
Mobil USB Spektrometre/ Thorlabs SPD-USB	Dalga boyu ölçümünde kullanılmıştır.	Ebatları 4.4x3.6x2.0 inc, CCD duyarlılığı 300 V/(Ix.s), piksel boyutu 7 µm x 200 µm,190 Hz'e kadar veri güncelleme.
Osiloskop/ Goodwill GDS840S	Bant ölçümünde Fabry-Perot etalonla kullanılmıştır.	Bant genişliği 250 MHz, hasasiyet 2 mV/kare-5mV/kare, max. Gerilim 300V.
Piezo Güç Kaynağı ve Üç Boyutlu Piezo Optik Tutucu/ Thorlabs MDT693A	Bu cihazla hassas dalga boyu ölçümü yapılmıştır. Saydam kırınım ızgarası optik tutucu üzerine monte edilmiştir.	Üç kanallı, max çıkış akımı 60 mA, voltajı 0-75 V.
Lazer Işığı Güç Ölçer/ Thorlabs PM100	Lazer çıkış ışığını belirlemede kullanılmıştır.	23 ⁰ C 'de 30 dakika çalışması sonucunda oluşan voltaj değeri 7.5-15-30-60-120-240-480 V aralığında değişir, 5Hz'den 1 kHz'e kadar okumada kesinlik var.

Tablo 3.1'in devamı.

Adı / Modeli	Tezde Kullanım Amacı	Teknik Bilgi
400nm-1100nm Güç Ölçer Sensör/ Thorlabs S130A	Lazer çıkış ışığının belirlenmesinde kullanılmıştır.	Ebatları 10x10 mm ² (sq), silikon sensör, çalışma aralığı 400-1100 nm, optik güç aralığı 5 mW-500 mW, eşik akım değeri 50 W/cm ² operasyon sıcaklığı 5 °C ile 40 °C arasında.
Piko saniye mertebesinde Darbe Üretici/ SRS DG535	Lazer ışığını tetiklemek için kullanılmıştır.	4 bağımsız gecikme çıkışı, 5 ps kararlılık, 25 ppm kristal osilatör, 10 MHz referans girişi, 85 ns tetikleme gecikmesi.
Yüksek Voltaj Güç Kaynağı/ SRS PS350	Foto çoklayıcı tüp için gerekli güç kaynağı olarak kullanılmıştır.	1 V çözünürlüklü, 25 W çıkış gücü, çift kutupluluk, %0.05 doğruluk, güncelleme hızı 16 Hz.
Mekanik ve Elektronik Atölyesi	Tezde kullanılacak mekanik ve elektronik parçaların hazırlanmasında kullanılmıştır.	Lehim aleti, ısı tabancası, delme tezgahı, yontma ve parlatma parçaları, 20 mm'lik matkap, tornavida ve pense setleri, aylan takımı, hassas veri kabloları, kablo bağlantı elemanları bulunmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. SİSTEMİN MATEMATİKSEL HESABI

4.1.1. Kırınım Denklemi

Kırınım denklemi eşitlik 4.1 ile verilmiştir.

$$m\lambda = d(\sin\theta_D + \sin\theta_I) \quad (4.1)$$

Burada; m , kırınım mertebesi; λ , gelen aydınlanma ışınının dalga boyu; θ_D , aydınlatma ışınının m inci mertebeden kırınım açısı; θ_I , aydınlatma ışınının gelme açısıdır.

Özel bir durum olarak; kırınım açısının 1 inci mertebesi ($\sin\theta_D$), gelme açısına ($\sin\theta_I$) eşit olduğunda, eşitlik 4.2 elde edilir.

$$\lambda = 2d\sin\theta_I \quad (4.2)$$

Buna *Bragg Yasası* denilmektedir. Bu denkleme göre, kırınım ızgarasının açısı değiştirilerek, istenilen akortlama sağlanır.

Burada; θ_I , ışının gelme açısını; λ , lazer diyotunun belirli bir sıcaklık ve akımdaki dalga boyunu vermektedir. Kırınım periyodu d ise, kırınım ızgarası üzerinde her bir milimetredeki ızgaranın sayısını vermektedir.

4.1.2. Lazer Kovuğunun Bant Genişliği Ölçümü

Schawlow-Townes formülü eşitlik 4.3'te verilmiştir.

$$\delta v_{int} = \frac{v_g^2 h \nu n_{sp} g_{th} \alpha_{mir}}{8 \pi P_{out}} (1 + \alpha^2) \quad (4.3)$$

δv_{int} : Tek modlu (tek dalga boyulu) diyot lazer için bant genişliği

δv_{ext} : Lazer kovuğu büyütülmüş diyot lazerin bant genişliği

v_g^2 : Grup hızının karesi

v : Frekans

n_{sp} : Kendiliğinden yayılım faktörü

g_{th} : Genlik durumu

α_{mir} : Aynadaki kayıp

α_{int} : Tek modlu lazer diyotun aynasının kaybı

P_{out} : Çıkış gücü

α^2 : Henry sabiti

L : Lazer kovuğunun büyütölmüş boşluk uzunluğu

n : Kırıcılık indisi

c : Işık hızı

R : Yansıma katsayısı

h : Planck sabiti

d : Lazer kovuğunun ilk uzunluğu

n_i : Tek modlu lazerin kırıcılık indisi

n_e : Tek modlu lazerin büyütölmüş kovuğunun kırıcılık indisi

τ_{int} : Tek modlu diyot lazerin kovuğunun içerisindeki elektronun ömrü

τ_{ext} : Tek modlu diyot lazerin büyütölmüş durumdaki kovuğunun içerisindeki elektronun ömrü

$$g_{th} = \alpha_{int} + \alpha_{mir} \quad (4.4)$$

$$\delta v_{int} = \frac{v_g^2 h v n_{sp} (\alpha_{int} + \alpha_{mir}) \alpha_{mir}}{8 \pi P_{out}} (1 + \alpha^2) \quad (4.5)$$

$$\delta v_{int} = \left(\frac{h v}{8 \pi P_{out}} \right) v_g^2 (\alpha_{int} + \alpha_{mir}) \alpha_{mir} n_{sp} (1 + \alpha^2) \quad (4.6)$$

$$\Delta v_{FWHM} = \left(\frac{h v}{8 \pi P_{out}} \right) \left(\frac{c}{nL} \right)^2 \left[aL + \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right] \ln \left(\frac{1}{R} \right) n_{sp} (1 + \alpha^2) \quad (4.7)$$

$$v_g^2 = \left(\frac{c}{nL} \right)^2 \quad (4.8)$$

$$\alpha_{int} = aL \quad (4.9)$$

$$\alpha_{mir} = \ln \left(\frac{1}{R} \right) \quad (4.10)$$

Tek modlu diyot lazerin büyütülmüş bant genişliği eşitlik 4.16'da verilmiştir.

$$\delta v_{ext} = \delta v_{int} \left(1 + \frac{\tau_{ext}}{\tau_{int}} \right)^{-2} \quad (4.11)$$

Burada ;

$$\tau_{int} = \frac{2n_i d}{c} \quad (4.12)$$

$$\tau_{ext} = \frac{2n_g L}{c} \quad (4.13)$$

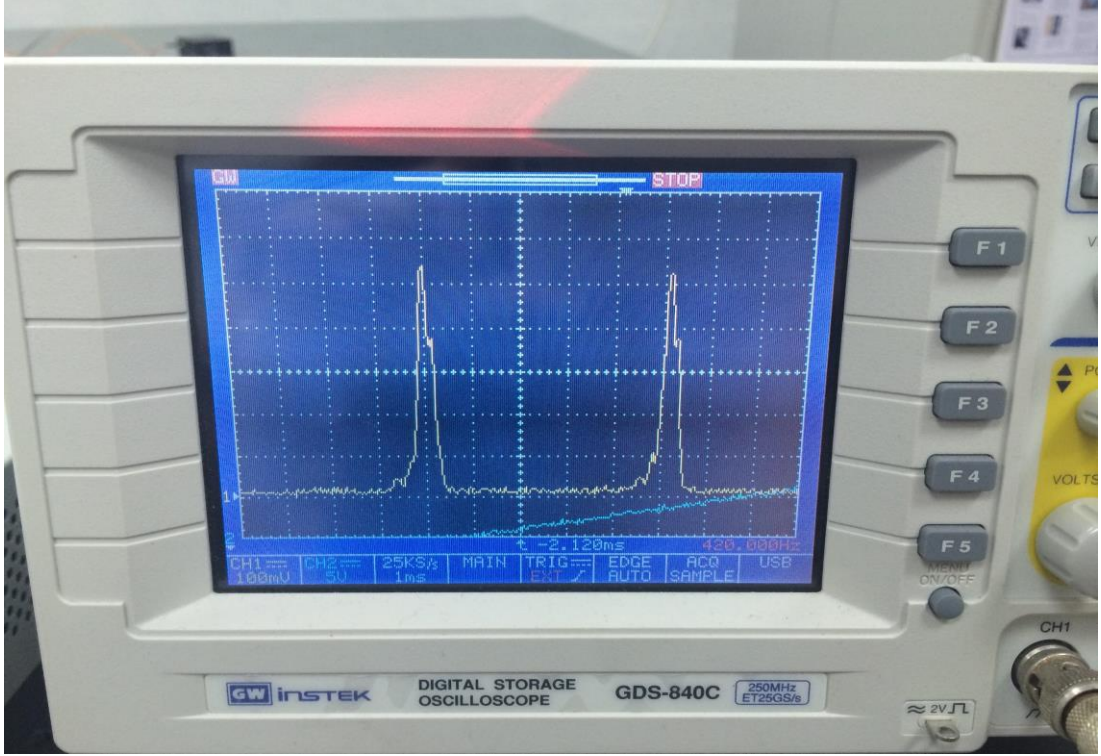
$$\delta v_{ext} = \left(\frac{h v}{8 \pi P_{out}} \right) v_g^2 (\alpha_{int} + \alpha_{mir}) \alpha_{mir} n_{sp} (1 + \alpha^2) \left(1 + \frac{\tau_{ext}}{\tau_{int}} \right)^{-2} \quad (4.14)$$

$$\delta v_{ext} = \left(\frac{h v}{8 \pi P_{out}} \right) v_g^2 (\alpha_{int} + \alpha_{mir}) \alpha_{mir} n_{sp} (1 + \alpha^2) \left(1 + \frac{2n_g L}{2n_i d} \right)^{-2} \quad (4.15)$$

$$\delta v_{ext} = \left(\frac{h v}{8 \pi P_{out}} \right) v_g^2 (\alpha_{int} + \alpha_{mir}) \alpha_{mir} n_{sp} (1 + \alpha^2) \left(1 + \frac{n_g L}{n_i d} \right)^{-2} \quad (4.16)$$

1.Deneyde Alınan Veriler: Teorik olarak frekans seçici elemanın diyot lazerin önüne 23.25⁰'lik açı ile konulması gerekmektedir. Sistemimizde frekans seçici eleman tam merkezlenemediği için optik besleme 20⁰'de sağlanmıştır. 20⁰ ile 19⁰ arasında frekans seçici elemanın açısı değiştirildiğinde, 3 nm'lik bir değişim görülmüştür. 19⁰'nin altındaki açı değerlerinde ve 20⁰'nin üstündeki açı değerlerinde herhangi bir dalga boyu değişimi gözlenmemiştir. Dalga boyu tarama aralığı 661 nm ile 664 nm arasında bulunmuştur.

2.Deneyde Alınan Veriler: Şekil 4.1'de osiloskop yardımıyla alınan veri bulunmaktadır. Fabri-Perot Etalon' un teorik verisine göre; iki mod arası uzaklık (Δv_{FSR}) 1500 MHz'dir. Osiloskopta görüldüğü kadarıyla iki mod arası uzaklık beş karedir ve her mod (Δv_{FWHM}) bir karenin onda birine denk gelmektedir. Deneysel hesaplamalar sonucu, saydam kırınım ızgarası kullanılarak yapılan bu deneyde; bant genişliğinin 30 MHz olduğu bulunmuştur.



Şekil 4.1. Mersin Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Lazer Laboratuvarı'nda kurulan HOSDL sisteminde osiloskop yardımıyla alınan frekans bant genişliği ölçümünü gösteren fotoğraf.

Bragg kırınım denklemi; lazer ışığının önüne konulan saydam kırınım ızgarasının açısının belirlenmesinde kullanılır. Böylece, daha hassas ayarlı ve akortlanmış bir lazer ışığı elde edilir. Bu denklemin tezde kullanılma amacı; saydam frekans seçici kırınım ızgarasının açısı değerini, lazer ışığının dalga boyuna göre hesaplamaktır.

Schawlow-Townes denklemi; lazer ışığının içerisinde bulunan modların birbirlerine olan uzaklığını bulmada kullanılır. Bu formül içerisindeki sabitler yerlerine yazıldığında, lazer içerisindeki her bir modun frekans bant genişliği bulunabilir. Bu denklemin tezde kullanılma amacı; lazer ışığı içerisindeki her bir modun frekans bant genişliğini hesaplamaktır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1.Deneyde Yapılan Hesaplamalar:

$$m\lambda = 2d (\sin\theta_D + \sin\theta_i) \quad (5.1)$$

m , kırınım mertebesi; λ , dalga boyu; d , ızgara üzerindeki çizgi sayısı; $\sin\theta_D$, gelme açısı; $\sin\theta_i$, kırınım açısıdır.

$$m=1 \text{ ve } \sin\theta_i = \sin\theta_D \quad (5.2)$$

$$\lambda = 2d \sin\theta_D$$

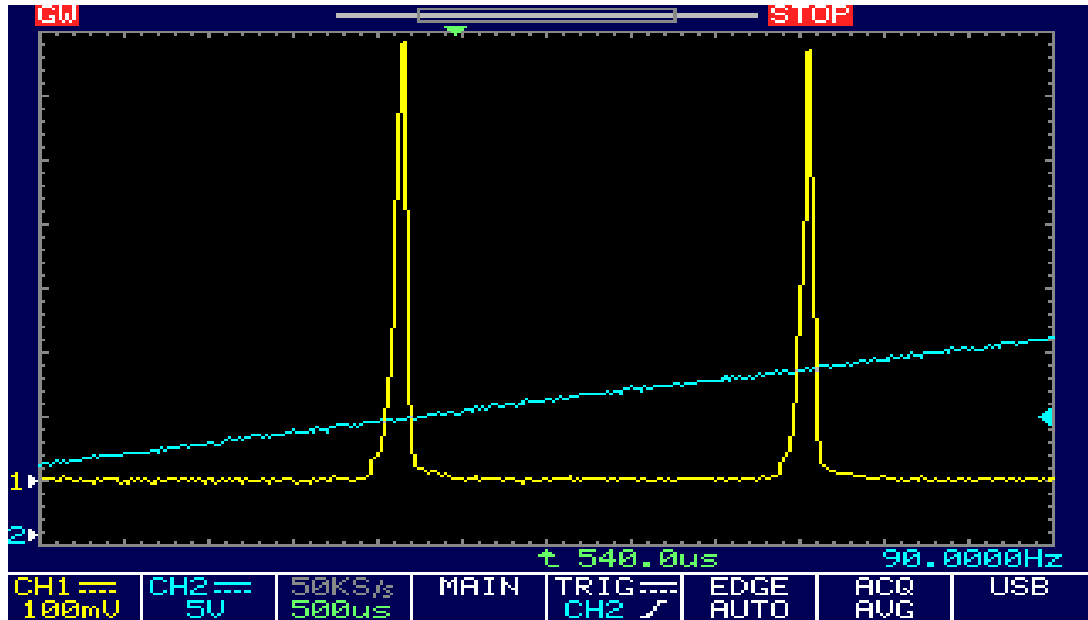
$$658\text{nm} = 2 (1/1200)\sin\theta_D \quad (5.3)$$

$$\sin\theta_D = 0.3948 \quad (5.4)$$

$$\arcsin(0.3948) = \theta_D \quad (5.5)$$

$$\theta_D = 23.25^\circ \text{ (frekans seçici elemanın lazer diyotu önüne konması gereken açı)} \quad (5.6)$$

2.Deneyde Yapılan Hesaplamalar:



Şekil 5.1. HOSDL sistemiyle alınan bant genişliği ölçümü.

Her kare 500 μs 'dir. İki mod arası uzaklık (Δv_{FSR}) beş karedir.

$$5 \times 500 \mu s = 2500 \mu s \text{ (toplam zaman)} \quad (5.7)$$

2500 μs toplam 1500 MHz frekansa sahiptir. Deneyde ulaşılmak istenen; her bir modun frekansının bulunmasıdır. Her bir mod, osiloskopta bulunan bir karenin içerisindeki iki noktanın arasına gelmektedir. Her bir kare 500 μs 'dir ve her karede on nokta vardır. Bir nokta 50 μs 'ye karşılık gelmektedir. Yani seçilen bir mod 50 μs 'dir. Bunun frekansı hesaplanırsa;

50 μs 'lik tek mod (Δv_{FWHM})

$$\frac{2500 \mu s \text{ 'lik iki mod arası uzaklık } (\Delta v_{FSR})}{50 \mu s \text{ 'lik tek mod } (\Delta v_{FWHM})} = \frac{1500 \text{ MHz ise}}{X \text{ MHz}} \quad (5.8)$$

$$X = \frac{1500 \text{ MHz} \times 50 \mu s}{2500 \mu s} = 30 \text{ MHz} \quad (5.9)$$

Yapılan bu deneyde; iki mod arası uzaklık (Δv_{FSR}) artırılmış, tek bir modun bant genişliği (Δv_{FWHM}) daraltılmıştır. Daha dar bantlı bir lazer ışığı elde edilmiştir. Elde edilen dar bantlı lazer ışığının frekansı 30 MHz'dir. Lazer tam güçte (135 mA) çalıştırılmıştır. Direnç anlık olarak değiştiği için, voltaj değeri okunmamıştır. Lazer ışığının güçlendirilip, osiloskoba aktarılması için Fabry Perot Etalon kullanılmıştır. Fabry Perot Etalon' un okuduğu en düşük frekans 7.5 MHz'dir. Lazer kafası 25 $^{\circ}C$ 'de sabit kalmıştır. Oda sıcaklığı ve bağıl nem değişmemiştir.

Kullanılan Bragg Yasası ile saydam kırınım ızgarasının açısı hesaplandı ve bu hesaba göre lazer ışığının önüne frekans seçici saydam kırınım ızgarası yerleştirildi. Yapılan ölçümler sonucu; her bir modun frekans bant genişliği 30 MHz bulundu. Daha hassas bir osiloskopla daha dar bantlı lazer ışığı elde edilebilir. Daha hassas bir Fabry Perot Etalonla daha dar bantlı lazer ışığı elde edilebilir.

Yapılan bu tez çalışmasından yola çıkılarak; farklı yarı iletken diyotlar sisteme konularak, bant genişlikleri ölçülebilir. Bir katalog hazırlanabilir. Bu katalogdan faydalanılarak, istenilen frekansta lazer diyotu seçilip, farklı çalışmalarda kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Hayashi, I. and Sumski, S., “Junction Lasers Which Operate Continuuously at Room Temperatura”, Apply. Phys. Lett., 109-111s., (1970).
- [2] Fleming, M. W. and Mooradian, A., “Spectral Characteristics of External Cavity Controlled Semiconductor Lasers”, IEEE J. Quantum Electron, 17-44s., (1981).
- [3] Zoorebedian, P., “Tunable Lasers Hand Book”, F. J. Duate Academic, London, 50-60s., (1995).
- [4] Wieman E. and Hollberg L., “Using Diode Lasers For Atomic Physics”, Rev. Sci. Instrum, 62s., (1991).
- [5] Galbacs G., “Review of Applications and Experimental Improvements Related to the Diode Laser Atomic Spectroscopy”, Appl. Spectros. Rev., 259-303s., (2006).
- [6] Okur, İ., (Çeviri Editörü), “Lazerler”, Değişim Yayınları, İstanbul, 3-21s., (2006). [Milloni, P. W. and Eberly, J. H., “Lasers”, John Wiley & Sons, New York (1988).]
- [7] Milloni, P. W. and Eberly, J. H., “Laser Physics”, John Wiley & Sons, New Jersey, 105-110s., (2008).
- [8] Milloni, P. W. and Eberly, J. H., “Laser Physics”, John Wiley & Sons, New Jersey, 1116-120s., (2008).
- [9] Hecht, E., “Optics, 3rd ed.”, Addison Wesley Longman, United States, 115-174s., (1998).
- [10] Band, Y. B., “Light and Matter”, John Wiley & Sons Ltd., England, 210-220s., (2007).
- [11] Verdeyan, J., “Laser Electronics, 3rd ed.”, Prentice Hall, New Jersey, 100-150s., (1995).
- [12] Hecht, E., “Optics, 3rd ed.”, Addison Wesley Longman, United States, 771-793s., (1998).
- [13] Orazio, S., “Principles of Lazers”, Plenum Press, New York, 306s., (1994).
- [14] Freeman, W. H., “Lasers and Ligth”, Scientific Amerikan, San Francisco, Chapter 4, (1969).
- [15] Wilson, J. and Hawkes J. B., “Laser Principles and Applications”, Prentice Hall, UK, (1987).
- [16] Wilson, J. and Hawkes, J., “Optoelectronics, 3rd ed.”, Bell & Bain Ltd., Glasgow, 257-266s., (2006).

- [17] Renk, K. F., “Basics of Laser Physics”, Springer, New York, 200-210s., (2012).
- [18] Svelto, O. and Hanna, D. C., “Principles of Lasers, 4th ed.”, Springer, United State of America, Chapter 5, (1998).
- [19] Okur, İ., (Çeviri Editörü), “Lazerler”, Değişim Yayınları, İstanbul, 174s., (2006). [Milloni, P. W. and Eberly, J. H., “Lasers”, John Wiley & Sons, New York (1988).]
- [20] Okur, İ., (Çeviri Editörü), “Lazerler”, Değişim Yayınları, İstanbul, 178s., (2006). [Milloni, P. W. and Eberly, J. H., “Lasers”, John Wiley & Sons, New York (1988).]
- [21] Wilson, J. and Hawkes, J., “Optoelectronics, 3rd ed.”, Bell & Bain Ltd., Glasgow, 270-275s., (2006).
- [22] Milloni, P. W. and Eberly, J. H., “Laser Physics”, John Wiley & Sons, New Jersey, 226-230s., (2008).
- [23] Fowles, G. R., “Introduction to Modern Optics, 2nd ed.”, Holt Rinehart & Winson, NY, Chapter 4, (1975).
- [24] Milloni, P. W. and Eberly, J. H., “Laser Physics”, John Wiley & Sons, New Jersey, 298-302s., (2008).
- [25] Einstein, A., “Introduction to Masers and Lasers”, McGraw Hill, NY, Chapter 3, (1971).
- [26] Einstein, A. “Resonant Modes in a Maser Interferometer”, Bell System Tech., 40s., (1961).
- [27] Okur, İ., (Çeviri Editörü), “Lazerler”, Değişim Yayınları, İstanbul, 198-204s., (2006). [Milloni, P. W. and Eberly, J. H., “Lasers”, John Wiley & Sons, New York (1988).]
- [28] Hecht, J., “Understanding Lasers, 3rd”, IEEE Press, UK, 161-180s., (2008).
- [29] Milloni, P. W. and Eberly, J. H., “Lasers”, John Wiley & Sons, New York, 414-430s., (1988).
- [30] Hecht, J., “Understanding Lasers, 3rd”, IEEE Press, UK, 223-230s., (2008).
- [31] Silfvast, W. T., “Laser Fundamentals”, Press Syndicate of the University of Cambridge, United State of America, Chapter 5., (1996).
- [32] Hecht, J., “Understanding Lasers, 3rd”, IEEE Press, UK, 317-323s., (2008).
- [33] Hecht, J., “Understanding Lasers, 3rd”, IEEE Press, UK, 185-203s., (2008).
- [34] Anderson, J. D., “Gas Dynamic Lasers An Introduction”, Academic Press, New York, Chapter 3., (1976).

- [35] Ohtsubo, J., “Semiconductor Lasers, 2nd ed.”, Springer, New York, 240-260s., (2008).
- [36] Ye,C., “Tunable External Cavity Diode Lasers”, World Scientific Publishing, London, 14-20s., (2004).
- [37] Numai, T., “Fundamentals of Semiconductor Lasers”, Springer, New York, 176-188s., (2004).
- [38] Telle, H., Urena, A. and Donovan, R., “Laser Chemistry”, John Wiley & Sons, England, Chapter 3., (2007).
- [39] Palmer, C., “Diffraction Grating Handbook, 5th ed.”, Thermo RGL, USA, 138-144s., (2002).
- [40] Loewen, E. G. And Popov, E., “Diffraction Gratings And Applications”, Markel Dekkel, New York, 149-188s, (1997).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: SEMA BACANAK

Doğum Tarihi: 12/07/1987

Öğrenim Durumu:

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	SÜPER LİSE (YDA)		2001-2005
Lisans	FİZİK	MERSİN ÜNİVERSİTESİ	2007-2012
Yüksek Lisans	LAZER FİZİĞİ	MERSİN ÜNİVERSİTESİ	2012-2014