

HELYUM-NEON LAZERİ

Amaç

Bu deneyde, lazerin çalışma prensibinin anlaşılması, lazerin ışımaya gücünün ve iraksamasının bağlı olduğu parametrelerin incelenmesi amaçlanmaktadır.

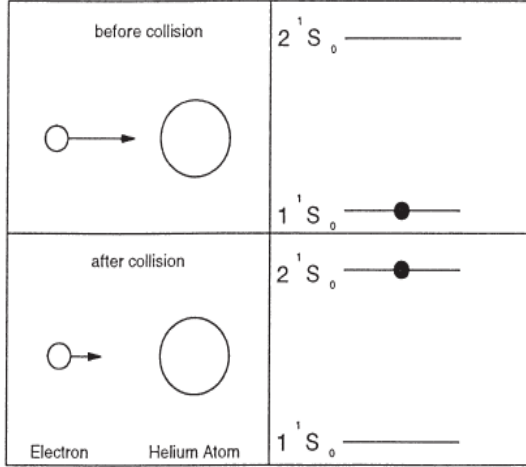
Deneye Hazırlık Bilgileri

Atomlar kendi aralarında, serbest elektronlarla, veya ışık tanecikleriyle (foton) etkileşebilirler. Etkileşme enerjisinin yeterli olması durumunda da esnek olmayan çarpışmalar ile atomlar uyarılır, yani atomların son yörüngesindeki elektronlar üst enerji düzeylerine çıkar. Uyarılmış atomlar bir süre sonra kendiliğinden tekrar eski taban durumuna geçerler. Bu geçiş sonucunda da elektronun çıktığı üst düzey ile geçiş yaptığı alt düzey arasındaki enerji farkına eşit enerjiye sahip herhangi bir yönde foton salımı gerçekleşir. Bu tür salımlara kendiliğinden salım denir. Uyarılmış durumdaki bir atomla uyarılma enerjisine eşit enerjiye sahip bir foton etkileştiğinde de atom alt enerji seviyesine geçerek ikinci foton salımı yapar fakat bu foton atomla etkileşen diğer foton ile aynı yönde salınır. Her iki fotonun dalga boyu aynıdır ve faz farkı yoktur. Bu tür salımlara da uyarılmış salım denilmektedir. Uygun ortam ve koşullarda belirli dalgaboyundaki ışığın uyarılmış salımlarla kuvvetlendirilmesiyle lazerler oluşturulur. Lazer kelimesi anlamına uygun olarak İngilizce; Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (uyarılmış salımların radyasyonu ile ışığın kuvvetlendirilmesi) ifadesindeki kelimelerin baş harfleri kullanılarak türetilmiştir. Lazerler temelde ışığın kuvvetlendirilmesini sağlayan gaz, sıvı veya katı malzemeyi içeren bir tüp ve tüpün iki ucunda bulunan iki aynadan oluşmaktadır. Elektrik akımı, yoğun bir ışık kaynağı veya kimyasal tepkimeler gibi yöntemler kullanılarak lazer tüpünün içindeki madde uyarılır. Aynalar vasıtasıyla da oluşan monokromatik (tek renkli) ışık kuvvetlendirilmek üzere tekrar tüpün içerisindeki ortama yansıtılır. Aynalardan birinin yansıtma oranı çok yüksek iken diğeri biraz geçirgenlik özelliği gösterecek şekilde tasarlanmıştır. Bu şekilde eğer lazerin kuvvetlendirilmesi ve beslenmesi kayıplardan büyükse geçirgen aynadan çıkan bir lazer ışığı oluşur. Uyarılmış salımların kuvvetlendirilebilmesi için nüfus terslenmesi denilen durumun oluşması gerekmektedir. Üst enerji seviyelerine uyarılmış atomların sayısının alt enerji seviyesinde bulunan atomlardan fazla olması durumuna nüfus terslenmesi denmektedir.

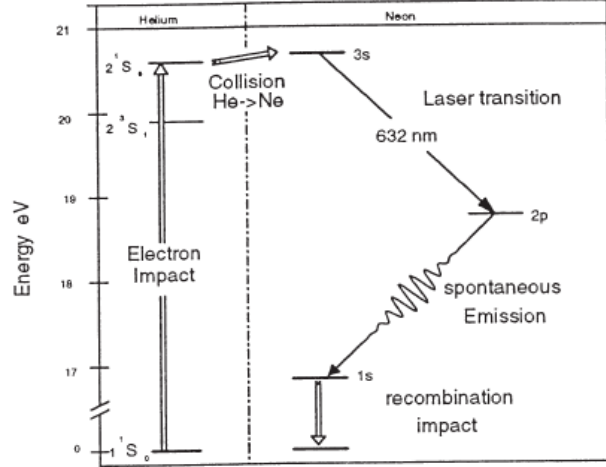
a. Lazer Geçişleri

Helyum-Neon lazeri ilk sürekli lazerdir. Javan, Bennett ve Herriot tarafından 1961 yılında icat edilmiştir ve halen yaygın olarak kullanılmaktadır. Atom spektrumlarının iyi bilinmesi ilk lazerlerin oluşturulması için Helyum (He) ve Neon (Ne) gazlarının seçilmiş olmalarında çok faydalı olmuştur. Lazerin oluşturulduğu ortam %80 oranında He ve %20 oranında Ne gazlarının karışımından meydana gelir. Düşük yoğunluklu bu gaz karışımı yüksek gerilim altında atomların bir kısmının iyonlaştığı plazma haline dönüşür, buna yük boşaltım gazı denir. Yük boşaltım gazındaki yüksüz atomlar çoğunlukla serbest elektronların çarpmalarıyla uyarılır (Bakınız Şekil 1). Bu şekilde uyarılan He atomlarının en düşük enerjili iki uyarılmış durumu 2^3S_1 ve 2^1S_0 yarıkararlıdır çünkü taban durumuna optik geçişleri (foton salarak) yasaktır. Taban durumuna sadece diğer atomlara veya tüp duvarlarına çarparak geçerler. Uyarılmış He atomlarının bir kısmı yüksüz Ne atomlarına çarparak foton salımı olmadan enerjilerini aktarır Ne atomlarını uyarır. Şekil 2'de He ve Ne atomlarının enerji seviyeleri gösterilmiştir. Helyumun 2^1S_0 seviyesi Neonun $3s$ ($1s^22s^22p^55s^1$) seviyesinin 47 meV kadar altındadır. Fakat atomların kT termal enerjisi bu küçük farkı karşılamak için yeterlidir. Ne atomlarının s seviyelerinin kararlılık süreleri p seviyelerinden yaklaşık 10 kat daha fazladır. Bu yüzden $3s$ seviyesiyle $2p$ ($1s^22s^22p^53p^1$) seviyesi arasında lazerin oluşması için

gerekli şart olan nüfus terslenmesi gerçekleşir. Söz konusu seviyeler arasında 632 nm dalgaboyundaki kırmızı ışığa karşılık gelen lazer geçişi oluşur.



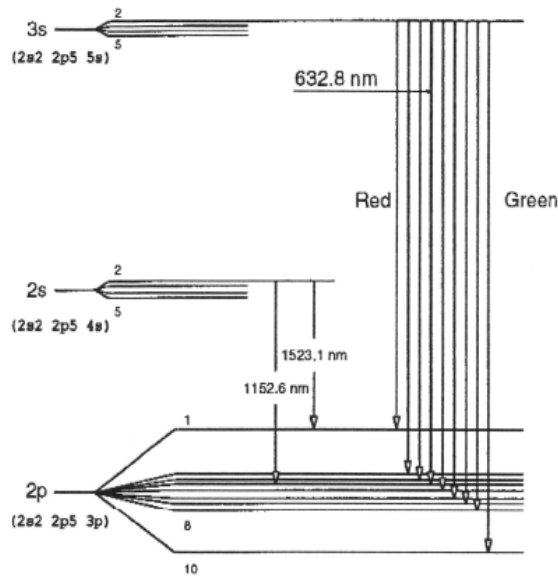
Şekil 1 Elektron çarpması sonucu He atomunun uyarılması



Şekil 2 Kırmızı lazer geçişini oluşturan uyarılma döngüsü

2p seviyesindeki elektronlar kendiliğinden ışımaya yoluyla hızlı bir şekilde 1s ($1s^2 2s^2 2p^5 3s^1$) seviyesine geçerler. Bu seviyeden taban durumuna ($1s^2 2s^2 2p^6$) geçişler Ne atomlarının tüp duvarlarına çarpmalarıyla gerçekleşir çünkü iki seviye arasındaki optik geçiş izinli değildir. Kazançların kayıpları geçebilmesi için Şekil 2'de gösterilen döngünün hızlı bir şekilde gerçekleşmesi yani lazer geçişini gerçekleştiren Ne atomlarının hızlı bir şekilde tekrar taban durumuna geçmeleri gerekmektedir. Sonuç olarak tüpün çapı mümkün olduğunca küçük olmalı. Öte yandan yüksek çıkış gücü elde edebilmek için tüp hacminin mümkün olduğunca büyük olması gerekir. Günümüz He-Ne Lazerleri birbirine zıt bu iki koşulun optimal durumunda çalışır.

Şimdiye kadar sadece 632 nm dalgaboylu kırmızı lazeri oluşturan enerji seviyelerinden bahsettik. Fakat, laboratuvarlarda 200 kadar farklı lazerin oluşturulabildiği Neon geçişleri mevcuttur. Şekil 3'te en önemli lazer geçişleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi sadece görünür bölgede değil 2s - 2p geçişinde olduğu gibi kızılötesi lazerler de oluşturulabilmektedir.



Şekil 3 Lazer Geçişleri

b. Gaz Lazerlerin Frekansı

Gaz lazerlerin frekansları Doppler etkisinden dolayı bir ortalama değer etrafında dağılım gösterirler. Bu durumu He-Ne lazeri için şu şekilde açıklamak mümkündür: Ne atomları tüpün içerisinde farklı hızlarda ve neredeyse serbest olarak hareket etmektedir. Kütleleri m , hızı v ile $v+dv$ arasında olan Ne atomlarının sayısı Maxwell-Boltzmann dağılımıyla verilir:

$$n(v)dv = N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) dv \quad (1)$$

Burada N Ne atomlarının toplam sayısı, T mutlak sıcaklık, ve k Boltzmann sabitidir. Yukarıdaki denklem tüm uzay boyutlarını içerir. Sadece tüp boyunca olan doğrultuyla ilgilendiğimiz için tek boyutta hız dağılımı

$$n(v_x)dv_x = N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right) dv_x \quad (2)$$

şeklindedir. Durgun çerçevedeki gözlemci Doppler etkisinden dolayı ışıma ve soğurma frekanslarının kaydığını görecektir. Bu kayma

$$v = \left(1 \pm \frac{v_x}{c} \right) v_0 \quad (3)$$

şeklindedir. v_0 durgun Ne atomunun ışıma veya soğurma frekansı c de ışığın boşluktaki hızıdır. Denklem (3)'ten hızı çekip denklem (2)'de yerine koyarsak frekansa bağlı dağılım ifadesi elde edilir:

$$n(v)dv = N \left(\frac{mc^2}{2\pi kT v_0^2} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{mc^2(v-v_0)^2}{2kT v_0^2}\right) dv \quad (4)$$

Lazer ışığının şiddeti ışıma veya soğurma yapan Ne atomlarının sayısı ile orantılı olacaktır ışık şiddeti

$$I(v) = I(v_0) \exp\left(-\frac{mc^2(v-v_0)^2}{2kT v_0^2}\right) \quad (5)$$

ile verilir. Bu Gauss dağılımının standart sapması,

$$\sigma = \sqrt{\frac{kT}{mc^2}} v_0 \quad (6)$$

şeklindedir. Kütle azaldıkça, sıcaklık ve frekans arttıkça lazer frekansının dağılımı Doppler etkisinden dolayı artar. Denklem (5) ile ifade edilen ışık şiddeti dağılımına kazanç profili denir.

Lazerin iki ucunda yer alan aynalardan oluşan sisteme optik rezonatör denir. Yük boşaltım gazında kendiliğinden salım yoluyla oluşturulan lazer ışınlarının optik rezonatör doğrultusunda olanları aynalar arasında birçok defa yansır ve gaz ortamından her geçişlerinde uyarılmış salımlarla güçlenirler. Eğer lazerin beslenmesi kayıpları karşılayacak ölçüdeyse rezonatörün içinde duran lazer dalgaları oluşur. Duran dalgalara rezonatörün salınan kipleri, özkipler veya sadece kipler de denmektedir. Dalgaların ayna yüzeylerindeki sınır şartlarından dolayı her kip

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad \text{veya} \quad L = n \frac{c}{2\nu} \quad (7)$$

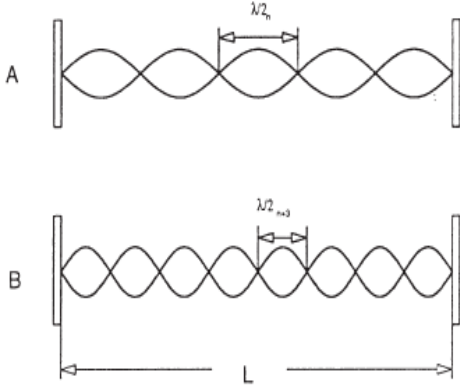
şartını sağlamak zorundadır (Bakınız Şekil 4). L aynalar arasındaki uzaklığı (rezonatörün boyunu), λ ve ν oluşturulan lazerin dalgaboyu ve frekansını, n de bir tamsayıyı simgelemektedir. Böylece her kipi kendi

$$\nu(n) = n \frac{c}{2L} \quad (8)$$

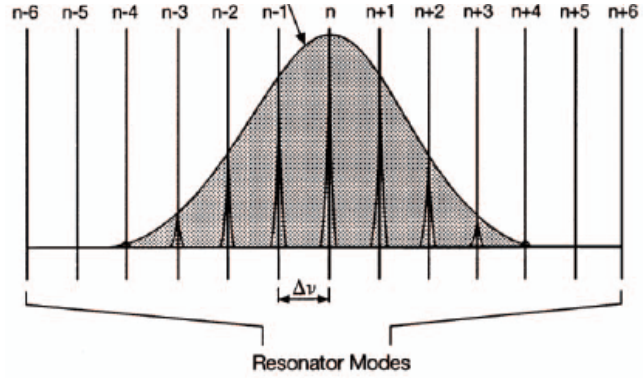
frekansı vardır.

Doppler etkisinden kaynaklanan ve denklem (5) ile ifade edilen Ne atomlarının ışınım dağılımı (kazanç profili) optik rezonatörün içerisinde aynalardan defalarca yansırarak güçlenir. Fakat ışık şiddetindeki güçlenme sadece denklem (8) ile verilen kip frekanslarında

gerçekleşir. Sonuç olarak da Şekil 5'te gösterilen lazer ışığı dağılımı oluşur (Sadece küçük pikler kalır.).



Şekil 4 Optik rezonatörde oluşan duran dalgalar. A: 6 düğüm noktalı durum, B: 9 düğüm noktalı durum.



Şekil 5 Optik rezonatör kipleriyle etkileşen kazanç profili.

Nicel olarak bu olay şöyle açıklanabilir: Örneğin, rezonatör boyu 50 cm olan ve 632.8 nm dalgaboyunda salım yapan bir He-Ne lazeri için n değeri

$$n = 2L/\lambda = 2 \times 0.5 / 632.8 \times 10^{-9} \approx 1.58 \times 10^6$$

olarak bulunur. Bu durumda ardışık iki kip arasındaki frekans farkı,

$$\Delta \nu = \nu(n+1) - \nu(n) = (n+1) \frac{c}{2L} - n \frac{c}{2L} = \frac{c}{2L} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 0.5} = 300 \text{ MHz}$$

olur. Yük boşaltım gazının sıcaklığı 400 K alınırsa, kazanç profilinin genişliğini de denklem (6)'dan yaklaşık 600 MHz olarak hesaplanabilir. Bu durumda kazanç profilinin içerisinde birkaç kip yer alır. Rezonatör boyu yeterince kısa seçilirse kazanç profilinin içerisinde sadece bir kip yer alır ve sonuç olarak çok keskin frekans değerine sahip lazer elde edilir.

c. Lazer Rezonatörlerinin Kararlılık Şartı

Rezonatörü oluşturan aynaların yapıları ve aralarındaki uzaklık kararlılık durumunu etkilemektedir. Bunu anlamak için bir lazer ışınının rezonatör içerisinde tam bir tur dolandığında geometrik optik anlamında davranışını incelemek gerekmektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi bir rezonatör odak uzaklıkları f_1 ve f_2 olan bir sol ve bir sağ aynadan oluşmaktadır. Koordinat sistemi, z eksenini sayfanın sağına doğru x eksenini de sayfanın üst tarafına doğru olacak şekilde seçilmiştir. Sol ayna $z=0$ konumunda sağ ayna da $z=d$ konumunda bulunmaktadır. Aynaların odak uzaklıkları f_i ve merkez uzaklıkları $R_i = 2f_i$ yakınsak mercekler için pozitif, ıraksak mercekler için de negatif alınır. Şekil 6'da görüldüğü gibi optik eksenden (z ekseninden) herhangi bir x_i mesafesi ve optik eksenle herhangi bir θ_i açısıyla sol aynadan başlayarak sağ ayanaya doğru ilerleyen bir ışını düşünelim. x_i ve θ_i değerlerinin küçük açı yaklaşımına olanak tanıyacak kadar küçük olduğu varsayılırsa ($\sin \theta_i \approx \theta_i, x_i \ll \min(R_1, R_2)$), ışın sağ aynaya (S_2) vardığında optik eksenden uzaklığı

$$x_i' = x_i + d \cdot \theta_i \quad (9)$$

olur. Işın yansdıktan sonra mesafesi aynı kalır fakat açısı değişir. Şekil 7 aynadan yansıyan ışının geometrisini göstermektedir. Buna göre,

$$\theta_i' = \theta_i + 2\alpha \quad (10)$$

ve küçük açı yaklaşımı kullanılarak

$$\theta_i + \alpha \approx \sin(\theta_i + \alpha) = \frac{x_i'}{R_2} \quad (11)$$

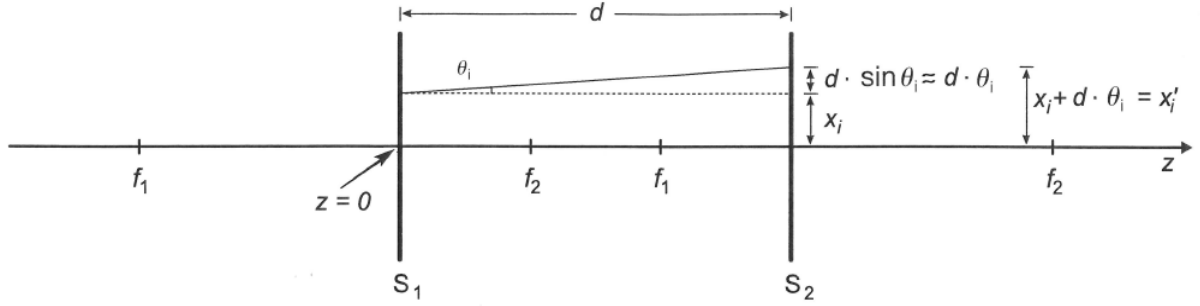
bulunur. Son iki denklemde α yok edilerek

$$\theta_i' = \frac{x_i'}{f_2} - \theta_i \quad (12)$$

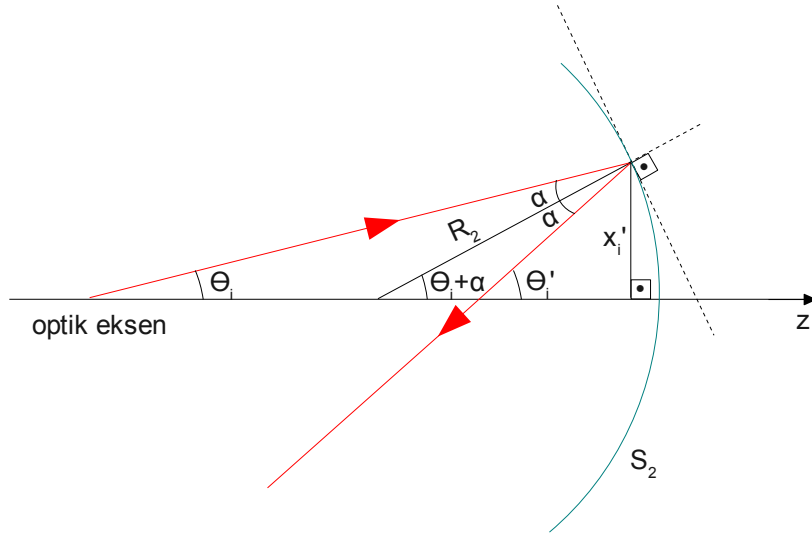
bulunur. Bu da x_i ve θ_i cinsinden

$$\theta_i' = \frac{x_i + d \cdot \theta_i}{f_2} - \theta_i = \frac{1}{f_2} x_i + \left(\frac{d}{f_2} - 1 \right) \theta_i \quad (13)$$

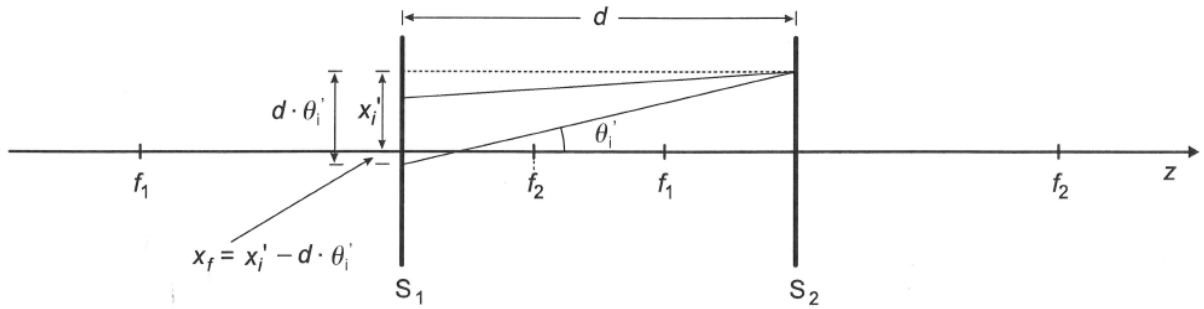
şeklinde elde edilir.



Şekil 6 Sol aynadan sağ aynaya doğru hareket eden ışın



Şekil 7 Sağ aynadan yansıyan ışın



Şekil 8 Sol aynaya geldiğinde ışının optik eksene olan uzaklığı

şeklinde bulunur. Lazer ışınının aynalar arasında n defa gidip geldiği düşünülürse, optik rezonatörün kararlılık şartı, dönüşümün n defa uygulanması sonucundaki özdeğer probleminin,

$$\begin{pmatrix} x_f \\ \theta_f \end{pmatrix} = M^n \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ \theta_i \end{pmatrix} \quad (19)$$

sonlu özdeğerlerinin (λ_n) bulunmasına bağlıdır. n defa ötelenmiş dönüşümün özdeğerleri denklem (17) ile ifade edilen özdeğer probleminin genel olarak karmaşık sayı olan λ özdeğerlerinin n. kuvvetine eşittir:

$$\lambda_n = \lambda^n \quad (20)$$

Dolayısıyla, denklem (17)'nin özdeğerlerini bilmek yeterlidir. Bu özdeğerler,

$$\lambda^2 + \left(2 - \frac{2d}{f_1} - \frac{2d}{f_2} + \frac{d^2}{f_1 f_2} \right) \lambda + 1 = 0 \quad (21)$$

karakteristik denklemini sağlarlar. Bu noktada, rezonatör boyu d 'nin ayna eğrilik yarıçapına R_i oranı kullanılarak tanımlanan ve kararlılık faktörü denilen yeni bir parametrenin

$$g_i = 1 - \frac{d}{R_i} = 1 - \frac{d}{2f_i} \quad (22)$$

kullanılması daha uygun olmaktadır. Denklem (21), kararlılık faktörü kullanılarak

$$\lambda^2 + (4g_1 g_2 - 2)\lambda + 1 = 0 \quad (23)$$

şeklinde yazılabilir ve çözümü de

$$\lambda = -(2g_1 g_2 - 1) \pm \sqrt{(2g_1 g_2 - 1)^2 - 1} \quad (24)$$

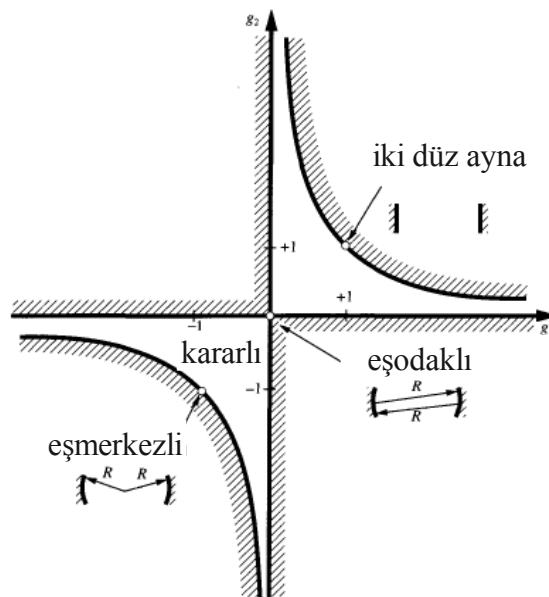
olur. Bu özdeğerlerin mutlak değeri 1'e eşit olmalıdır, aksi halde n arttıkça $\lambda_n = \lambda^n$ değeri sonsuza veya sıfıra gider. λ 'nın gerçel sayı olduğu durumda kararlılık faktörleri, $g_1 = g_2 = 1$ eşitliğini sağlar. Bu durumda denklem (22)'den $R_1 = R_2 = \infty$ olur, yani her iki aynanın düz olması anlamına gelir. Fakat bu değerler gerçek bir kararlılık durumu oluşturmaz çünkü fiziksel olarak her zaman mevcut olan g_i faktörlerindeki ufak sapmalar $\lambda_n = \lambda^n$ 'nin sonsuza veya sıfıra gitmesine ve kararlılık durumunun bozulmasına yol açar. λ 'nın karmaşık sayı olduğu durumda yani

$$(2g_1 g_2 - 1)^2 - 1 < 0 \quad (25)$$

eşitsizliği sağlandığında, özdeğerlerin mutlak değeri 1'dir ve kararlılık durumu

$$0 < g_1 g_2 < 1 \quad (26)$$

olarak bulunur. Şekil 10'da kararlılık diagramı ve bazı özel rezonatörler gösterilmiştir.



Şekil 10 Kararlılık diagramı

d. Lazer Gücünü Etkileyen Unsurlar

Lazerin gücünü etkileyen birçok unsur bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları şöyledir: *Etkin hacim*: şiddeti yüksek kiplerin bulunabildiği gaz hacmi. Lazerin oluşturulduğu birkaç mm çapındaki silindirik tüp lazer ışığı için bir dalga kılavuzu işlevi görür. Silindirin yan duvarları enine kiplerin sınır koşullarını oluşturur. Çapın daha büyük olması daha fazla enine kipin oluşmasına ve gücün artmasına katkı sağlar. Öte yandan, lazer geçişini gerçekleştiren Ne atomlarının yarıkararlı 1s seviyesinden taban durumuna geçmeleri tüp duvarlarına çarparak gerçekleşir ve çap artarsa bu işlem zorlaşır.

Rezonatör boyu: Kazanç profiliyle etkileşen boyuna kiplerin sayısı (Bakınız Şekil 5) rezonatör boyu uzadıkça artar, çünkü denklem (8)'de görüldüğü gibi iki ardışık kipin arasındaki frekans farkı uzunlukla ters orantılıdır. Sonuç olarak, rezonatör boyu uzadıkça kazanç profili daha fazla sayıda kip ile doldurulduğu için lazerin gücü artar. Rezonatör boyu arttıkça lazer beneğinin içbükey aynalar üzerindeki çapı büyür ve kırınımdan kaynaklanan kayıplar artar. Denklem (26) ile verilen kararlılık sınırına yaklaştıkça güç hızla düşer.

Yük boşaltım tüpünün konumu: Lazer beneğinin çapı bir düz bir de içbükey aynadan oluşan yarı küresel rezonatör tipi için düz aynanın üzerinde küçük, içbükey aynanın üzerinde de büyük olur. Tüp içbükey aynaya yaklaştırılırsa beneğin çapı büyük olduğu için bir kısmı tüp duvarları tarafından soğurulacaktır. Ayrıca etkin hacim de azalacaktır. Sonuç olarak güç azalır.

Yük boşaltım tüpünün akımı: He-Ne lazerlerinin karakteristik özelliklerinden biri de demet gücünün besleyici akıma bağlı olarak tekdüze artmayıp belli bir maksimum değerden sonra azalmaya başlamasıdır. Bunun nedeni çok yüksek akımlarda Helyumun yarıkararlı uyarılmış durumlarının 2^1S ve 2^3S sadece tüp duvarları ve Ne atomlarına çarparak değil elektronların süper esnek çarpışmaları, $He(2^1S) + e \rightarrow He(1^1S) + e$, sonucunda da alt enerji düzeyine 1^1S geçmeleridir. *Not: Etkileşmeden sonraki toplam kinetik enerjinin etkileşmeden öncekine göre büyük olduğu etkileşmelere süper esnek çarpışmalar denir.*

e. Lazer Dalgaboyunun Belirlenmesi

Lazer ışığını bir kırınım ağından geçirerek dalgaboyunu ölçmek mümkündür. Ardışık iki kırınım ağı çizgisinden kırınıma uğrayan lazer ışınlarının yapıcı girişim yapabilmesi için iki ışının katettiği yol arasındaki farkın dalgaboyunun tam katı olması gerekmektedir. Şekil 13'te görüldüğü gibi kırınım şartı,

$$n\lambda = d \sin \theta \quad (27)$$

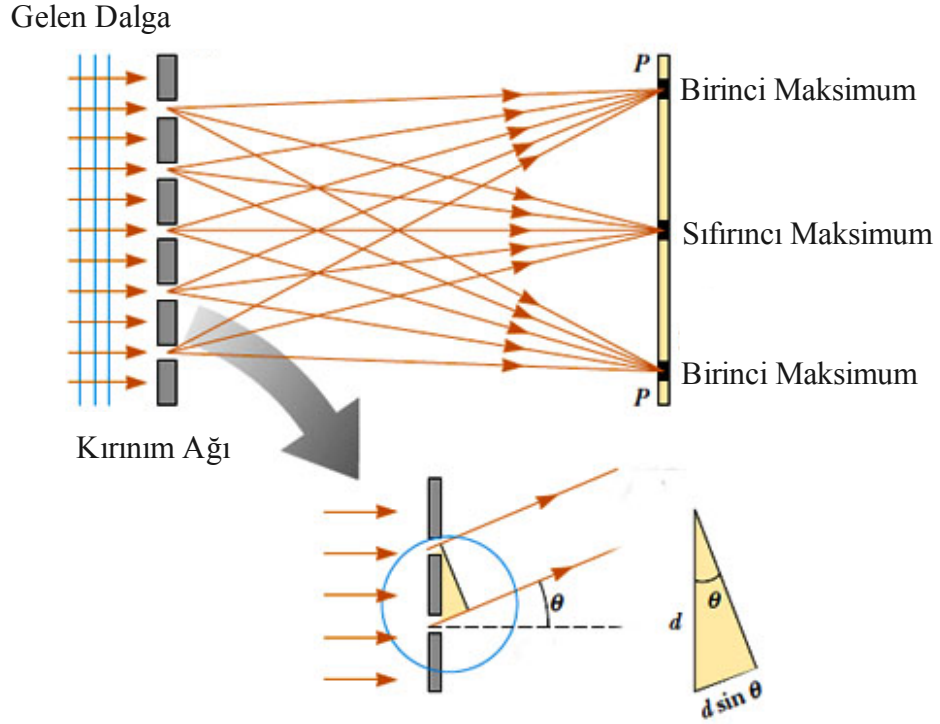
bağıntısını verir. Burada d kırınım ağının çizgi aralığını göstermektedir. n ise pozitif bir tamsayıdır. Kırınım ağı ile ekran arasındaki mesafeye z, sıfırıncı maksimum ile birinci maksimum arasındaki mesafeye de y dersek,

$$\tan(\theta) = \frac{y}{z} \quad (28)$$

bulunur. Sonuç olarak denklem (27)'ten dalgaboyu çekilerek

$$\lambda = \frac{d}{n} \sin \left[\arctan \left(\frac{y}{z} \right) \right] \quad (29)$$

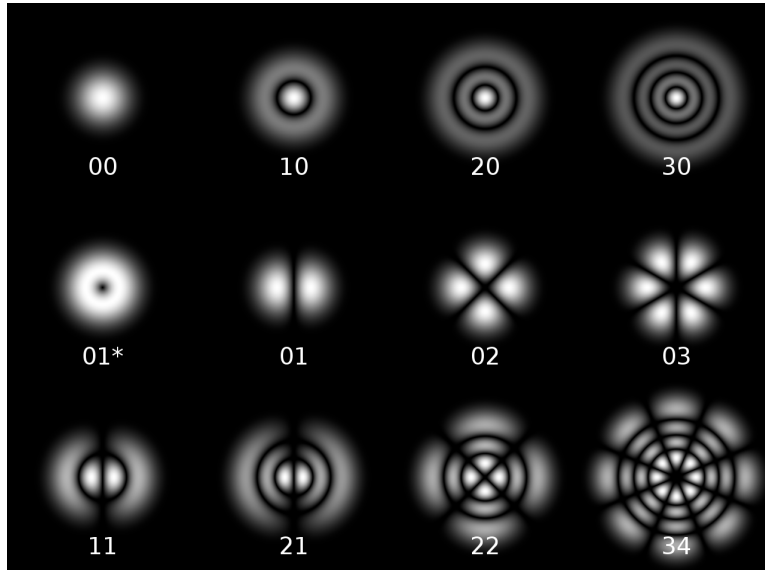
elde edilir.



Şekil 11 Kırınım ağından geçen lazer

f. Lazer Işınının Çapı ve Iraksaması

Daha önce boyuna kipleri incelemiştik, elektromanyetik dalgalar iki aynadan oluşan rezonatörün içerisinde hareket etmeye zorlandıkları için boyuna kiplerin oluştuğunu biliyoruz. Aktif ortamın bulunduğu tüp de rezonatör gibi elektromanyetik dalgalar için bir sınır oluşturmaktadır. Bu sınırların varlığı da enine kiplerin oluşmasına yol açar. Bunlara TEM (Transverse ElectroMagnetic) kipleri denir. Temel kip TEM_{00} 'dır. Buna Gauss kipi denir, çünkü oluşan lazer beneğinin şiddeti Gauss dağılımına sahiptir. Daha yüksek mertebeli kipler de TEM_{nm} ile gösterilir. n ve m birer pozitif tamsayıdır. Şekil 12 çeşitli n ve m değerleri için silindirik simetriye sahip enine TEM kiplerini gösterilmektedir.



Şekil 12 Silindirik simetriye sahip TEM kipleri

Silindirik koordinatlarda (r, φ, z) , kiplerin ışık şiddeti

$$I_{nm}(r, \varphi, z) = I_0 \left(\frac{2r^2}{w^2(z)} \right)^m \left[L_n^m \left(\frac{2r^2}{w^2(z)} \right) \right]^2 \cos^2(m\varphi) \exp \left(-\frac{2r^2}{w^2(z)} \right) \quad (30)$$

ile verilmektedir. Burada, L Laguerre polinomlarını simgelemektedir. Merkezdeki ışık şiddetinin $1/e$ 'ye düştüğü mesafe $w(z)$ ile tanımlanmıştır. Yani, $w(z)$ lazer beneğinin yarıçapını verir. Gauss kipi için ışık şiddeti

$$I_{00}(r, \varphi, z) = I_0 \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 \exp \left(-\frac{2r^2}{w^2(z)} \right) \quad (31)$$

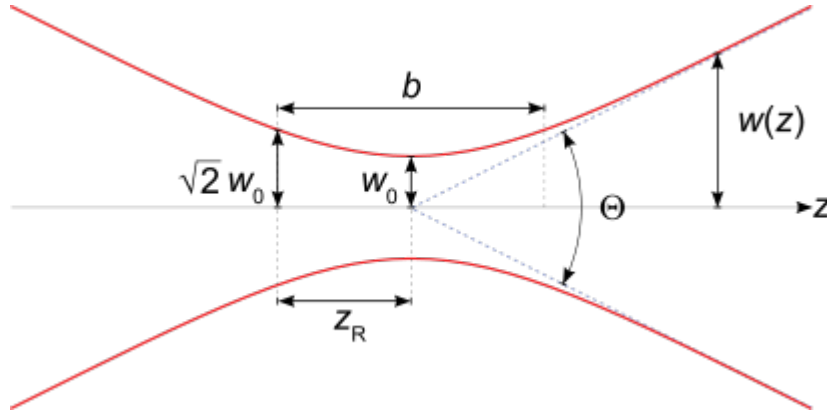
şeklinde bulunur.

Silindirik tüpün çapı yeterince küçükse sadece Gauss kipi oluşacaktır. Çap büyüdükçe Gauss kipinin yanında daha yüksek mertebeli kipler de oluşacaktır. Deneyde kullanılan HeNe tüpü sadece Gauss kipi oluşacak şekilde tasarlanmıştır. O yüzden deneyde ölçülecek ışın özellikleri Gauss kiplerinin teorik özellikleriyle karşılaştırılacaktır.

Gauss kipi için lazer beneğinin yarıçapı

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2} \quad (32)$$

ile verilir. Denklem (32) ile ifade edilen ışın yarıçapı Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13 Lazer ışınının ıraksaması

Işının en dar olduğu $z = 0$ noktasına ışının beli (beam waist) denmektedir. Bu minimum yarıçap değeri w_0 ile gösterilir. Işının kesit alanının iki katına çıktığı noktaya Rayleigh mesafesi denir ve

$$z_R = \pi w_0^2 / \lambda \quad (33)$$

ile verilir. $b = 2z_R$ mesafesi de odak derinliği olarak bilinir. Şekilde dağılma açısı da Θ ile gösterilmiştir. Şekil 14'da optik rezonatörde oluşturulan elektromanyetik dalgaların dalga cepheleri gösterilmiştir. Dalga cepheleri ile aynaların yüzeyleri çakışmak zorundadır. Bu durumda düz ayna ile çukur aynadan oluşan bir rezonatör için düz aynanın bulunduğu yerde ışının beli oluşur ve çukur aynanın bulunduğu yerde eğrilik yarıçapı aynanınkine eşit bir dalga cephesi oluşur. İki özdeş çukur aynadan oluşan rezonatör için lazer ışınının beli iki aynanın ortasında bulunacaktır. Dalga cephesinin eğrilik yarıçapı,

$$R(z) = z + \frac{z_R^2}{z} \quad (34)$$

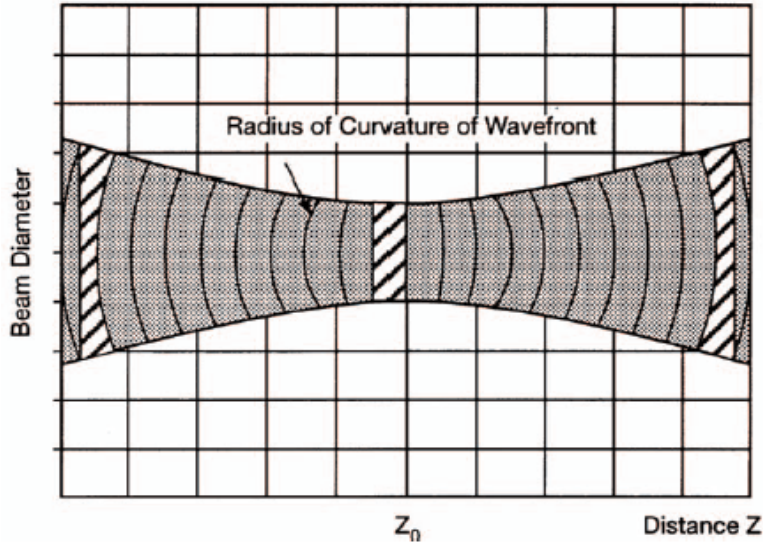
denklemleri ile verilir. Şekil 15'de görüldüğü gibi $z = z_R$ değerinde yani Rayleigh mesafesinde eğrilik yarıçapı en küçük ve $z = 0$ 'da sonsuz olur. $|z| \gg z_R$ için eğrilik yarıçapı çizgisel bir artışa sahiptir. Böylece lazer ışını bir koni şeklinde Θ açısıyla açılacaktır. Koninin yan yüzeyi ile optik eksen arasındaki açığı iraksama açısı $\theta = \Theta/2$ denir:

$$\theta = \arctan[w(z)/z] \approx w(z)/z \quad (35)$$

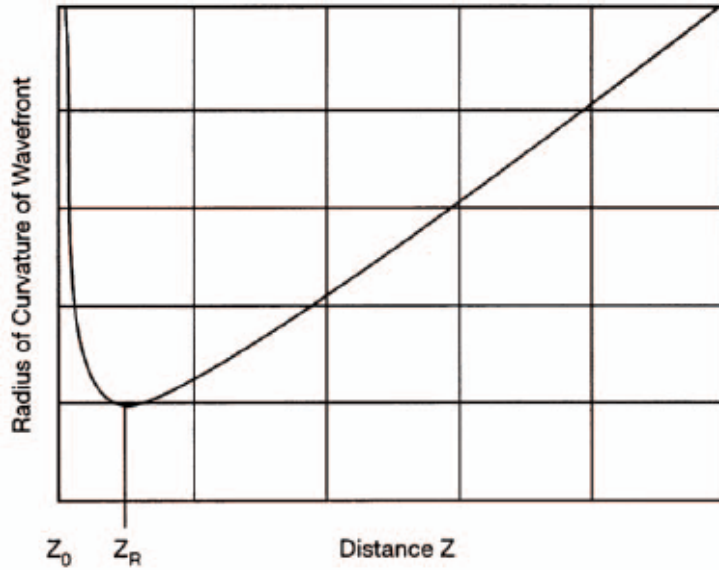
$|z| \gg z_R$ için denklem (32) ve (33) kullanılarak iraksama açısı

$$\theta = \arctan(w_0/z_R) \approx w_0/z_R = \lambda/\pi w_0 \quad (36)$$

olarak bulunur.



Şekil 14 Lazerin dalga cepheleri



Şekil 15 Dalga cephelerinin eğrilik yarıçapı

Şimdi $z = 0$ konumuna bir düz ayna ve $z = d$ konumuna eğrilik yarıçapı r_2 olan bir çukur ayna yerleştirdiğimizi düşünelim. Bu durumda, denklem (34)'ten

$$R(d) = r_2 = d + \frac{z_R^2}{d} \Rightarrow z_R^2 = d(r_2 - d) \quad (37)$$

$0 < r_2 < d$ olmak üzere denklem (33)'ten

$$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} \sqrt{d(r_2 - d)}} \quad (38)$$

bulunur. Denklem (32) kullanılarak

$$w(d) = w_0 \sqrt{1 + \frac{d}{r_2 - d}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} \left(\sqrt{d(r_2 - d)} + \sqrt{\frac{d^3}{r_2 - d}} \right)} \quad (39)$$

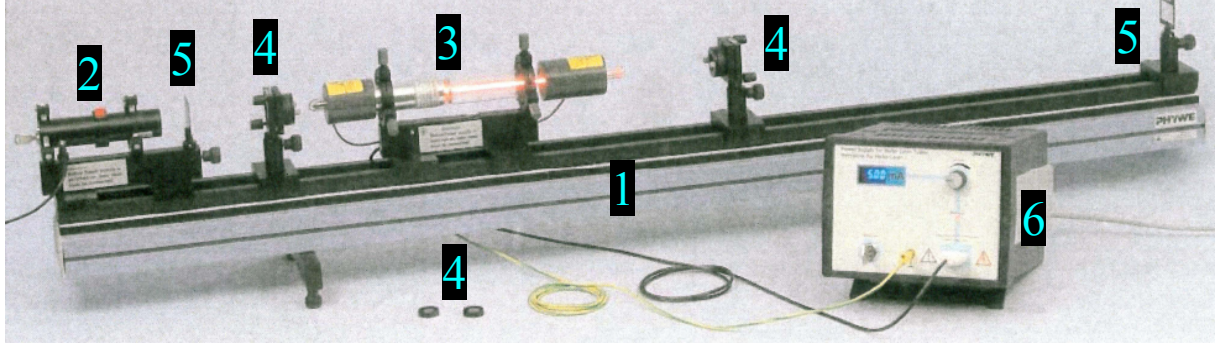
elde edilir. Son olarak denklem (36)'dan iraksama açısı

$$\theta = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} \frac{1}{\sqrt{d(r_2 - d)}}} \quad (40)$$

şeklinde bulunur.

Deneyde Kullanılacak Araçlar

Bu deneyde, optik ray (1), ayar lazeri (2), yük boşaltım tüpü (3), rezonatör aynaları (4), diyaframlar (5), yüksek gerilim güç kaynağı (6), taşıyıcılar, foto eleman, dijital multimetre, kırınım ağı, bağlantı kutusu, kumpas, bağlantı kabloları, koruyucu gözlük (Bakınız Şekil 16).



Şekil 16 Deney düzeneği

Not: Gerekli görülmesi halinde deneyler birleştirilerek yapılabilir.

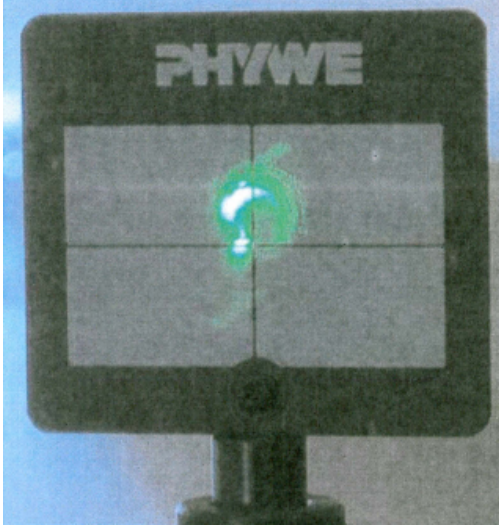
Deney 1. Lazer Sisteminin Ayarlanması ve Başlatılması

1. Ayar lazerini optik rayın sağına yerleştiriniz. (**Not:** Ayar lazeri, yük boşaltım tüpü ile rezonatör aynalarının doğrultu ayarının hassas bir şekilde yapılması için kullanılacaktır.)
2. Üzerinde "left" yazan diyaframı ayar lazerinin önündeki yuvaya, "left" yazısı lazere bakacak şekilde yerleştiriniz.
3. Üzerinde "right" yazan diyaframı yazı sağda kalacak şekilde taşıyıcılardan birini kullanarak optik rayın sağ ucuna yerleştiriniz.
4. Ayar lazerini arkasındaki anahtarı çevirerek çalıştırınız.

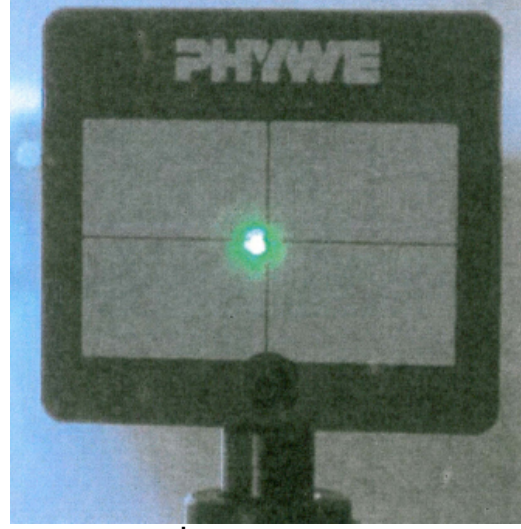
UYARI: Lazer ışığının doğrudan gözle temas etmesi gözde kalıcı hasara neden olduğundan, lazere doğrudan bakmayınız.

5. Lazer doğrultusunu her iki diyaframın ortasındaki ince delikten geçecek şekilde ayar lazerinin üzerindeki beyaz vidaları kullanarak ayarlayınız.
6. Sağ taraftaki diyaframı optik rayın üzerinden çıkararak sağ taraftan sırasıyla bir taşıyıcıyı, lazer tüpünü (yük boşaltım tüpünü), diğer taşıyıcıyı ve sonunda da yine sağ diyaframı optik rayın üzerine yerleştiriniz. Böylece daha sonra rezonatör aynalarının yerleştirilmesi gerektiğinde lazer tüpünü çıkarmaya gerek kalmayacak. Lazer tüpünün sol ucu sol diyaframdan yaklaşık 30 cm uzakta olacak şekilde tüpü konumlandırınız. Bunun için rayın üzerindeki cetveli kullanabilirsiniz.

7. Lazer tüpünün üzerindeki ayar vidalarını kullanarak lazer ışınının Brewster pencerelerinin tam ortasından geçecek ve içteki ince tüpün duvarlarından yansımaya sonuçu oluşan dağınık görüntüler oluşmamalı (Bakınız Şekil 17 ve 18). Lazer tüpü diyafram üzerindeki lazer beneğini biraz kaydırabilir (Bakınız Şekil 18). Bu önemli değildir, daha sonra ışın kaydırması denilen yöntemle giderilebilir.



Şekil 17 Kötü doğrultu ayarlaması



Şekil 18 İyi doğrultu ayarlaması

Not: Brewster pencereleri lazer tüpünün iki ucunda yer alan ve tüpün simetri eksenine yaklaşık 34 derecelik açı yapan saydam tabakalardır. Brewster pencerelerinin özelliği belli polarizasyondaki ışığı çok düşük kayıpla geçirmesi ve diğerini farklı yöne doğru kırmasıdır. Bu şekilde oluşan lazer çizgisel kutupludur.

8. Üzerinde "HR flat/1000 mm" yazan ve bir yüzü düz diğer yüzü de odak uzaklığı 500 mm olan içbükey olan yüksek yansımali (High Reflective) aynayı ayar yuvasının içine koyup yazılı tarafı sola yani lazere bakacak şekilde lazer tüpünün sağındaki taşıyıcıya yerleştiriniz. Ayar yuvasının üzerindeki düğmeleri kullanarak aynadan yansıyarak sol diyafram üzerine düşen lazeri ortalayınız.

UYARI: Kullanılan optik elemanların (lazer tüpünün uçları, rezonatör aynaları, vs.) cam yüzeylerine temas etmeyiniz, kenarlarından dikkatli bir şekilde tutarak kullanınız.

9. Her iki yüzü de düz olan ve üzerinde "HR flat/flat" yazan aynayı ayar yuvasının içine koyup yazılı tarafı sağa bakacak şekilde tüpün solundaki taşıyıcıya yerleştiriniz. Aynalar arası uzaklık yani rezonatör boyu 70 cm olacak şekilde düz aynayı ray üzerinde kaydırınız. Ayar yuvasının üzerindeki düğmeleri kullanarak aynadan yansıyarak sol diyafram üzerine düşen lazeri ortalayınız.

10. Ayar lazerini kapatıp, yüksek gerilim güç kaynağını kullanarak He-Ne Lazer düzeneğini çalıştırınız ve akımı 6.5 mA değerine ayarlayınız.

UYARI: Lazer tüpüne yüksek gerilim uygulandığından (2 kV mertebesinde) deney esnasında güç kaynağı kablolarına temas etmeyiniz.

11. Lazer tüpünün sağındaki aynanın ayar düğmelerini kullanarak tüm düşey ve yatay doğrultuları sistemli bir şekilde tarayınız. Bunu yaparken vidalardan birini yavaş diğerini de hızlı bir şekilde çeviriniz. Lazer tüpünden gelen ışık sağ aynadan yansıyarak tüpün sol ucunda geniş bir dairesel ışık beneği oluşturmaktadır. Bu beneğin konumunu gözlemek suretiyle, mesela önce benek orta noktanın yukarısında olacak şekilde aynayı ayarlayınız daha sonra da her seferinde beneği biraz aşağı taşıyıp (yarım milimetreden az olacak şekilde) diğer ayar düğmesiyle de biraz daha hızlı bir şekilde bu sefer orta noktanın önce sağına ve sonra soluna doğru beneği kaydırınız. Doğru noktayı bulduğunuzda lazer tüpün ucunda (Brewster penceresinin ortasında) belirgin bir parlamayla oluşacaktır.

12. Lazer şiddeti maksimum olacak şekilde lazer tüpü doğrultusunu, sol ve sağ aynanın doğrultu ayarlamasını birkaç defa yapınız.

13. Şekil 18'de görülen lazer beneğinin diyaframın merkezine kaydırılması daha önce bahsedilen ışın kaydırması yöntemiyle yapılır. Buna göre benek önce sağ aynanın ayar vidaları kullanılarak lazer ışığı kaybolmayacak kadar merkeze doğru kaydırılır, sonra lazer tüpünün ve sol aynanın doğrultusunu lazer şiddetini optimum yapacak şekilde ayarlanır. Sonra yeniden benek sağ ayna kullanılarak lazer kaybolmayacak şekilde merkeze doğru kaydırılır ve diğer optik elemanların doğrultusu lazer şiddetini maksimum yapacak şekilde ayarlanır. Bu işlem benek diyafram merkezine gelene kadar tekrarlanır.

Not: Lazer beneğinin diyaframın merkezine taşınması sonraki deneyler için kolaylık sağlayacaktır.

Deney 2. Optik Rezonatörün Kararlılık Kriterleri

Bu deneyde optik rezonatörün kararlılık kriterleri incelenecektir. Lazerin rezonatör boyu (aynalar arası uzaklık) ve aynaların eğrilik yarıçapı gibi rezonatör parametrelerine bağlılığı araştırılacaktır.

Not: Lazer düzeneğinde yapılan her türlü değişiklikten sonra lazer şiddeti maksimum olacak şekilde lazer tüpü doğrultusunu, sol ve sağ aynanın doğrultu ayarlamasını birkaç defa yapınız.

A. Lazeri optik rayın sol ucuna taşıma

1. Deney 1'de anlatılan basamakları tamamlayıp lazeri çalıştırınız.
2. Ayar lazerini sol diyaframla birlikte optik rayın üzerinden kaldırınız.
3. Yük boşaltım tüpünü soldaki düz aynaya doğru yaklaştırınız.
4. Sol aynayı taşıyıcı vidalarını gevşetip mümkün olduğunca sola kaydırınız. Bu arada taşıyıcı vidalarını tekrar sıkınca lazer kaybolmamalıdır.
5. Yük boşaltım tüpünü tekrar soldaki aynaya doğru yaklaştırınız.
6. Sağ aynayı yük boşaltım tüpüne doğru kaydırınız.
7. 4-6 işlemlerini sol ayna optik rayın sol ucuna ulaşıncaya kadar tekrar ediniz.
8. Deney 1'in 13. basamağında anlatılan ışın kaydırması yöntemiyle sağ diyaframdaki lazer beneğini ortalayınız.

B. Lazerin oluşabildiği en büyük rezonatör boyunun belirlenmesi

1. Sağ aynayı adım adım sağa doğru taşıyıcı vidaları sıkılınca lazer kaybolmayacak şekilde kaydırınız.
2. Her iki aynadaki lazer beneklerinin çapına bakarak lazer ışınının tüpün içerisinde yansımaya uğramaması için yük boşaltım tüpünün nasıl konumlandırılması (sol aynaya veya sağ aynaya yakın) gerektiğini düşününüz.
3. Lazerin kaybolmadığı en büyük rezonatör mesafesini bulunuz ve denklem (22) ile olan ilişkisini yorumlayınız. Rezonatör boyu belirlenirken aynaların, taşıyıcı tabanının yakın ucuna 0.5 cm uzak ucuna da 4.5 cm uzaklıkta olduğu hesaba katılmalıdır.

C. Farklı eğrilik yarıçapına sahip ayna ile en büyük rezonatör boyunun belirlenmesi

1. Lazeri çalışır durumda tutarak aynalar arasındaki mesafe (rezonatör boyu) 85 cm olacak şekilde sağ aynayı tüpe doğru yaklaştırınız.
2. Sağ aynayı üzerinde "HR flat/1400 mm" yazan, bir yüzü düz bir yüzü de çukur olan ayna ile değiştiriniz. Bunu yaparken ayar yuvasını ayar vidaları tüpe doğru olacak şekilde taşıyıcıya yerleştiriniz. Böylece, ayna uzaklığını arttırmış oluruz. Aynanın yazılı kısmının tüpe doğru yönelmiş olmasına dikkat edilmelidir.
3. Deney 1'in 11ci maddesinde anlatılan tarama yöntemini kullanarak lazeri tekrar oluşturunuz.
4. Deney 1'in 13. basamağında anlatılan ışın kaydırması yöntemiyle sağ diyaframdaki lazer beneğini ortalayınız.
5. Sağ aynayı adım adım sağa doğru taşıyıcı vidaları sıkılınca lazer kaybolmayacak şekilde kaydırınız.