

Lazer ve Ölçüm

Lazer - Frekansı Kararlı Elektromanyetik Dalga Kaynağı

1954 yılında kuantum elektroninin doğuşu ile başlayan çalışmalar 1958 yılında spektrumun mikrodalga ve optik bölgesinde eşfazlı ışınımın oluşumu için optik kazancın elde edilmesini sağlamış ve 1960 yılında optik frekanslarda ilk kuantum osilatörünün üretimi ile tamamlanmıştır

Günümüzde geniş spektral ($0,1\mu\text{m} - 10\mu\text{m}$) ve güç ($1\mu\text{W} - 1\text{MW}$) aralığında sürekli-dalga ve darbeli ($1\text{ms} - 1\text{fs}$) çok sayıda lazer geliştirilmiştir. Çeşitli özelliklere sahip bu lazerler tıp alanında, spektroskopide, optik saat ve optik haberleşmede, endüstriyel kesme ve kaynak işlemlerinde yaygın uygulama alanı bulmuştur.

Görünür bölgedeki ışınım frekansı yaklaşık 500 THz'dir (500 Trilyon Herz). Başka bir deyişle lazer ışınması 1 saniyede 500 trilyon salınım yapıyor. Ancak, 1 saniye içindeki 500 trilyon salınım sayısı sabit kalmıyor ve yaklaşık 5 salınım az veya çok olabiliyor. Bu değer, lazerin 1 saniye içindeki frekans veya periyot kararlılığını (5 salınım/500 trilyon salınım) göstermektedir. Bu özelliği, yani sabit frekanslı elektromanyetik dalga üretebilmesi, lazerlerin optik saat ve hassas uzunluk ölçümü gibi uygulamalardaki önemini her geçen gün artırmaktadır. Lazer ile elde edilen frekans kararlılığının teknolojik olarak ulaşılabilen çok iyi bir değer olduğunu iki örnek ile vurgulayabiliriz. Birinci örnek olarak bir doğa olayını ele alalım. Bilindiği gibi Dünya Güneş etrafında 1 yıllık periyotla, kendi eksen etrafında ise 1 günlük periyotla dönmektedir. Bu periyodik hareketlerin kararlılığı yaklaşık olarak milyarda bir civarındadır. İkinci örnekte ise günümüzde üretilen ve 1 günlük kararlılıkları milyarda bir veya on milyarda bir civarında olan, en pahalı RF sinyal jeneratörlerini veya kuvars osilatör temelli saatleri ele alalım.

Temel SI biriminden biri olan zaman (frekans) birimi saniye (Hz), günümüzde bin milyarda bir hatta bir milyon kere milyarda bir ($10^{-13} - 10^{-15}$) doğrulukla ölçülebilen bir birimdir. Bu nedenle, diğer birimlerin ölçüm doğruluklarını artırmak için zaman ve frekans ölçümlerinden yararlanılmaktadır.

Yüksek frekans doğruluğuna ($10^{-11} - 10^{-15}$) sahip elektromanyetik dalgaların üretilmesi ve bu doğrulukla da ölçülebilmesinin bilim ve teknolojiye çok büyük önemi vardır. Her ne kadar günümüzde en yüksek doğrulukla üretilen ve ölçülebilen birim zaman ve frekans olsa da hem bu birimin hassasiyetine olan gereksinim hem de bu birimden türetilen diğer birimlerin belirsizliğinin azaltılması, frekans ölçümlerine olan ihtiyacı her geçen gün artırmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda, hem mikrodalga hem de optik frekans standartlarıyla ilgili çalışmalar aktif bir şekilde devam etmekte olup 1×10^{-15} mertebesinde kararlılığa ulaşılmıştır.

Uzun yıllardan beri lazerlerin geliştirilmesine rağmen sıradan lazerlerin frekans kararlılıkları ve frekans doğrulukları $10^{-7} - 10^{-9}$ civarındadır. Ancak fiziksel birimlerin yüksek doğrulukla üretilmesi ve ölçülmesi, sabitlerin yüksek doğrulukla bilinmesi, spektroskopi uygulamaları, atomların lazer ile soğutulması ve tuzaklanması, gravitasyon dalgalarının algılanması çok kararlı lazerlerle mümkündür. Ölçümbilimde ise uzunluk ve yer değiştirme ölçümleri, zaman ve frekans standartları, haberleşme ve konumlama gibi teknolojik alanlardaki uygulamalar, hem lazerlerin frekans doğruluk ve kararlılığının $10^{-7} - 10^{-9}$ mertebelerinden $10^{-11} - 10^{-15}$ mertebelerine çıkartılmasına hem de onların mutlak frekans değerlerinin bu seviyelerde izlenebilir bir şekilde ölçülmesine olan ihtiyacı her geçen gün artırmaktadır.

Lazerlerin Frekans Kararlılığı

Örneğin sıcaklığın değişimiyle aynalar arası mesafe ve dolayısıyla lazer frekansı artarsa, elektronik sistem aynaların bağlandığı piezoelektrik ayna konumlandırıcısına geri besleme gerilimi göndererek aynayı ters yönde hareket ettirir ve lazerin frekansını atomların enerji geçişine sabitleyerek kararlı hale getirir. Lazer frekansının atomik ve moleküler geçişlerde kararlılığı elektronik sistemin parametrelerinin yanı sıra kullanılan atomik gazın parametrelerine de bağlıdır. Lazer-atomik gaz etkileşimi sırasında

Teşekkürler: Enstitümüzde lazer ve ölçüm altyapısının kurulmasında emeği geçen, bu alanda çalışmalarına halen devam eden tüm TÜBİTAK UME yönetimine ve çalışanlarına teşekkürü bir borç biliyorum.

soğurum rezonanslarının çizgi kalınlıkları, lazer frekans kararlılıklarını doğrudan etkilemektedir. Lazer frekansı, soğurum rezonansının tepe noktasına denk gelen frekansa kilitlendiği zaman tepe noktasının yakını etrafında salınım yapmaktadır. Bu salınım genliği geri besleme için kullanılan elektronik sistemlerin parametrelerine de bağlıdır. En iyi parametrelere sahip elektronik sistemler ile frekans stabilizasyonu sırasında elde edilen frekans kararlılıkları veya lazer frekans salınımları, rezonans soğurum spektrumunun çizgi kalınlığının 1000 kat altında olabilir. Bu nedenden dolayı de çeşitli dalga boyundaki lazerler ile etkileşime girebilecek enerji geçişlerine sahip gazlar seçilir.

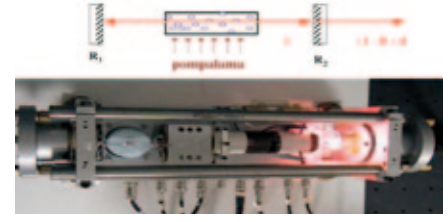
Bazı durumlarda rezonans kalitesini artırmak amacıyla lazer ışınması özel tasarlanmış, Fabry-Perot interferometresi rezonanslarına kilitlenmektedir. Fabry Perot interferometresi, en basit şekilde, aralarındaki mesafenin hassas bir şekilde ayarlanabildiği hizalanmış iki aynadan oluşur. Bu deneylerden farklı olarak, lazer atom veya moleküllerinin enerji geçişlerine kilitlendiği zaman, ürettiği elektromanyetik ışınımın çok iyi tanımlanmış ve dış etkenlerden kolayca etkilenemeyen bir frekansı vardır.

Lazer Frekans Ölçümü

İlk lazerlerin gerçekleştirilmesinden bugüne kadar frekansın atom ve moleküllerin enerji geçişlerine kilitlenmesi çalışmaları hızla yayılmış ve 60'lı yılların sonunda 10^{-11} - 10^{-12} mertebelerine ulaşılmıştır. Ancak iki seviyeli kuantum geçişleri ile belirlenmiş lazer frekansının RF ve mikrodalgadan farklı olarak çok yüksek değerlerde (500 THz) olması, lazerlerin mutlak frekans ölçümünü çok ciddi, zor ve pahalı bir deney olarak bilim adamlarının karşısına çıkarmıştır. 1972-1999 yılları arasında lazer frekans ölçümleri dünyada birkaç laboratuvarında kurulan RF-optik frekans zinciri ile yapılabiliyordu. Bu laboratuvarlar SSCB, Almanya, İngiltere ve ABD metroloji enstitülerinde kurulabilmişti ve bu laboratuvarlarda bile kısıtlı miktarda lazer frekansı ölçülebilirdi.

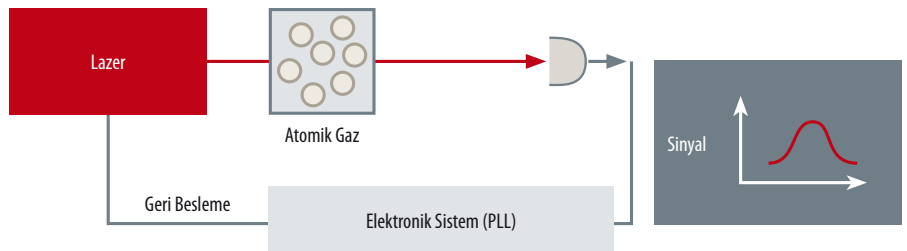
Lazer frekansını ölçmek zor olduğu için çok hassas metroloji deneylerinde, örneğin farklı ülkelerde yapılan lazer ile uzunluk ölçümleri deneylerinde, karşılaştırma deneyleri uygulanırdı. Bu yaklaşım şimdi de kısmi olarak devam etmektedir. 633 nm dalgaboyunda çalışan ve Paris'teki Uluslararası Ölçüler ve Ayarlar Merkezi (BIPM) tarafından geliştirilen lazerin frekansı RF-optik frekans zinciri ile ölçülmüştür. Bu ölçümler sırasında lazerin gücü, lazer frekans kitlemesinde kullanılan $^{127}\text{I}_2$ gazının basıncı ve lazer frekans modülasyonu belirli değerlere ayarlanmıştır. Diğer ülkelerde ve bizim ülkemizde, TÜBİTAK UME'de geliştirilen He-Ne/ I_2 lazerinin parametreleri aynı değerlere ayarlanmıştır. Bu cihaz, daha sonra BIPM'e taşınarak uluslararası standart ile "beat" tekniği kullanılarak karşılaştırılır.

2000 yılından itibaren geliştirilen femtosaniye lazerleri, optik frekans ölçümlerinde yeni bir devrim niteliği taşır. Derginin bu sayısında femtosaniye lazerler ve onların parametreleri hakkında bilgiler ayrıca sunulmuştur. Ancak biz burada femtosaniye lazerlerin optik frekans ölçüm metrolojisindeki önemini vurgulayacağız. Ti:Sa ve Er fiber femtosaniye lazer ışınları fotonik fiberden geçtikten sonra, kalınlıkları 20-100 fs ve aralarındaki zaman süreleri de 1-100 ns atımlar şeklinde yayılmaktadır. Elde edilen elektromanyetik spektrum aynen hassas bir cetvel gibi kullanılabilen ve bu özelliğinden dolayı frekans tarağı (*frequency COMB*) olarak adlandırılmaktadır. Tek renkli lazerin frekans ölçümlerinde kullanılan femtosaniye lazerin frekans tarakları, cetvel üzerindeki milimetre çizgileri gibi, bir ölçek niteliği taşımaktadır. Ölçümler sırasında frekans tarakları arasındaki fark, frekansının değişmemesi için atomik saatin referansı 10 MHz frekansına kilitlenmektedir.



Aktif ortam, iki aynadan oluşan optik rezonatör, aktif ortamdaki atom veya molekül temelli kuantum osilatörlerin üst seviyeye pompalanması ve ışınımın güçlendirilmesi ile elde edilen lazerin blok şeması ve bu ilkeler doğrultusunda TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsünde (UME) üretilen ve spektrumun kırmızı ışınım bölgesinde He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ lazerinin görüntüsü

Kullanılan atomik saatlerin frekans doğruluğu ve uluslararası izlenebilirliği ise GPS uyduları ve 250 atomik saatin kullanımıyla oluşan uluslararası koordine zaman (UTC) ölçeği üzerinden sağlanmaktadır. 2000-2010 yılları arasında fs COMB temelli lazer frekans ölçüm sistemleri onlarca laboratuvarında kurularak optik frekans ölçümlerine ve optik saatlerin yapılmasına ciddi ivme kazandırmıştır. Bu başarılar 2005 yılı Nobel Fizik Ödülü'nün Roy J. Glauber'e (Harvard Üniversitesi, ABD) "optik koherent olayların kuantum teorisinin geliştirilmesi", John L. Hall ve Theodor W.Hänsch'e ise "optik frekans comb tekniklerinin kullanımıyla hassas lazer spektroskopisi" alanında verilmesi ile önemsenmiştir. Sonuç olarak geliştirilen RF destekli fs COMB lazeri ile, 500 THz değerindeki lazer frekansı 1 Hz belirsizlikle ölçülebilir hale gelmiştir. Bu ölçümler atomik geçiş enerjilerinin yüksek hassasiyetle belirlenmesinde, lazer ile uzunluk ölçümlerinde, lazer dalgaboyunun belirlenmesi gibi uygulamalarda son derecede önemlidir. TÜBİTAK UME'de kurulan fs COMB temelli lazer frekans ölçüm sistemiyle He-Ne/ I_2 lazerinin frekansı $(473\,612\,353\,601,6 \pm 1,1)$ kHz olarak ölçülmüş ve diğer kurumlardaki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca TÜBİTAK UME ve Bilkent Üniversitesi'nin işbirliği kapsamında ülkemizde ilk fs fiber lazer COMB üretimi projesi TÜBİTAK'ın desteği ile başlatılmıştır.



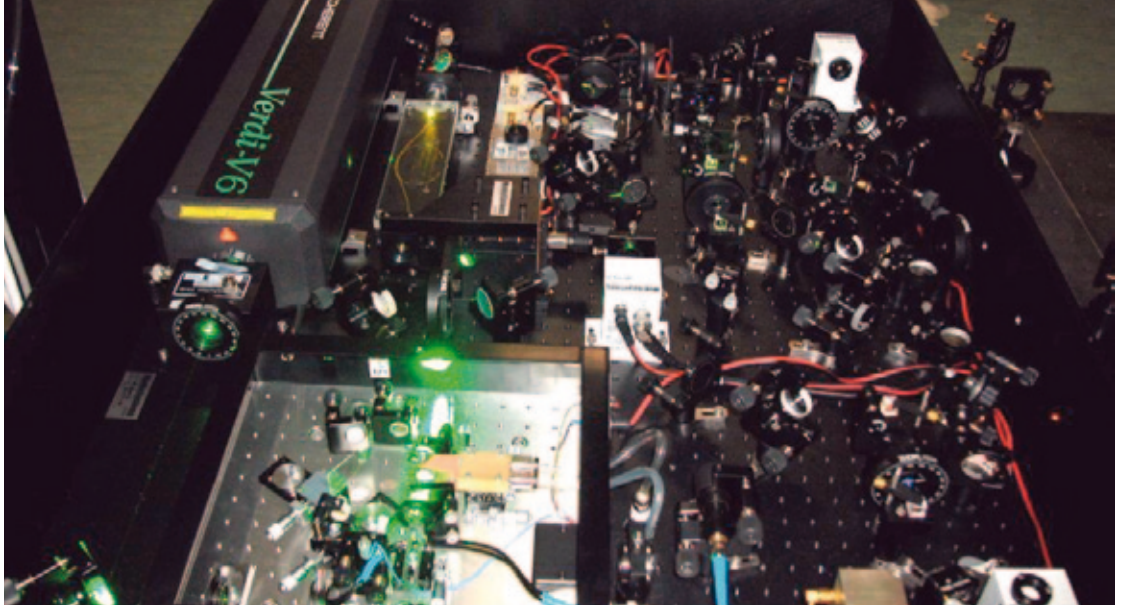
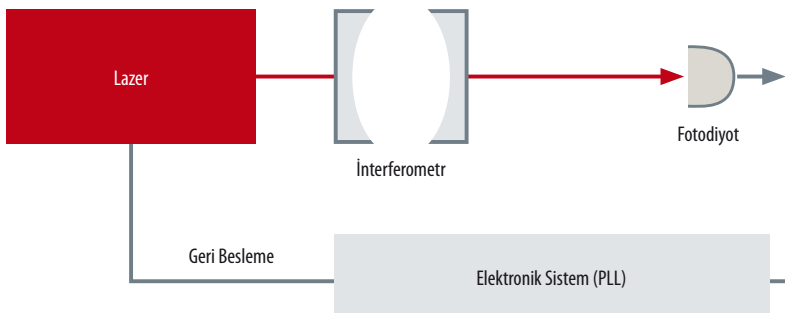
Lazer frekansının, atomların enerji geçişlerine kilitlenmesi deneyinin blok şeması



Ramiz Hamid fizikte lisans ve yüksek lisans derecesiyle 1985 yılında Moskova Devlet Üniversitesi'nden, lazer fiziği alanında ise doktora derecesiyle 1991 yılında Moskova Lebedev Fizik Enstitüsü'nden mezun olmuştur.

Ramiz Hamid 1993 yılından itibaren TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'ne katılarak zaman ve frekans, lazer dalgaboyu standartları ve elektromanyetik uyumluluk laboratuvarlarını içeren Elektromanyetik Grubu'nun kurulmasını koordine etmiştir ve halen bu grubun sorumluluğunu yürütmektedir. Doç. Dr. Ramiz Hamid'in bilimsel çalışmaları lazer spektroskopisi, lazer frekans kilitlenmesi ve ölçümleri, lazerlerin uzunluk ve elektromanyetik metroloji uygulamaları kapsamındadır.

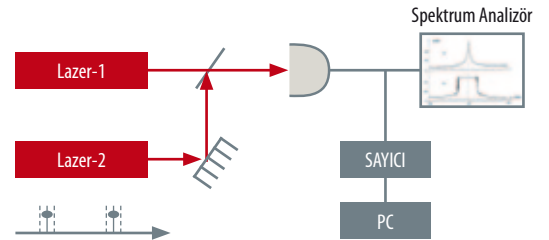
Lazer frekansının, interferometre boyutuna kilitlenmesi deneyinin blok şeması



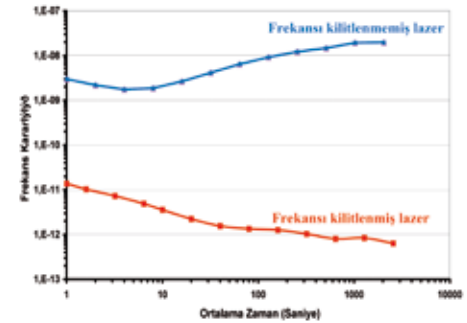
Ti:Sa femtosaniye COMB lazerinin görüntüsü

Sonuç

Lazer ve ölçüm alanında uluslararası gelişmelere paralel olarak son 15 yılda Türkiye'de birçok üniversitede uluslararası seviyede başarılı çalışmalar yapılmıştır. Lazerler ve ölçümler konusunda TÜBİTAK'ta ilk çalışmalar lazer interferometriyle yer değişim ölçümleri ve He-Ne lazer tasarımı ile Milli Fizik ve Teknik Ölçme Standartları Merkezi'nde 1986 yılında başlamıştır. Şimdi ki adıyla TÜBİTAK UME olarak bilinen bu enstitüde frekansı kararlı lazerlerin kullanımı ile yapılan lazer spektroskopisi deneylerinde atomlar arası çarpışmalar analiz edilmiştir. Lazerler ve interferometrelerin kullanımı ile 1mm-1 m boyutundaki master blokların uzunluğu 50-250 nm belirsizlikle ölçülmüştür. Ayrıca lazerler ile hassas yer değişim ve açı ölçümleri, mikrodalga alan şiddetinin analizi ve ölçümleri, fs fiber COMB lazerinin geliştirilmesi sürdürmekte olduğumuz yeni araştırmalar arasında yer almaktadır.



İki lazer frekans farkının "beat" deneyi tekniği ile ölçülmesi: Her iki frekans kilitli lazerin ışması, hızlı fotodiyot üzerine düşürülerek elde edilen "beat" sinyali spektrum analizör ile gözlenir ve iki lazer arasındaki frekans farkı bilgisayar kontrollü sayıcı ile ölçülerek istatistiksel yöntemler ile incelenir.



TÜBİTAK UME'de kurulan iki Nd:YAG/lazerinin frekans kararlılığının ortalama zamana göre değişimi: Mavi renkli eğri her iki lazer frekansı ¹²⁷I, moleküllerin enerji geçişlerine kilitlenmediği durumda, kırmızı eğri ise frekans kilitlenmesi sağlandığı durumda elde edilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi frekans kilitlenmemiş lazerin kararlılığı 10⁻⁹-10⁻⁷ arasında değişirken, frekans kilitlenmesi sağlandığında rezonatör boyundaki ve dolayısıyla lazer frekansındaki değişimler elektronik sistem ile telafi edilmiş ve frekans kararlılığı 10⁻¹¹-10⁻¹³ değerlerine kadar artırılmıştır.

Kaynaklar

- T. H. Maiman, *Brit. Commun. Electron.*, 1, 674, 1960.
Nobel Fizik Ödülleri ve Sunumları, www.nobelprize.org
Gill, P., ve Riehle, F., Report to the 17th Session of the CCTF Joint CCL-CCTF Working Group on Secondary Representations of the Second, 2006.
Demtröder, W., *Laser Spectroscopy*, 2. Basım Springer, 1996.
Hamid, R. ve diğ., "10-12 level reproducibility of an iodine stabilized He-Ne laser endorsed by absolute frequency measurements in the BIPM and UME", *Metrologia*, Cilt 43, Sayı 106, 2006.
Holzwart, R. ve diğ., "Optical clockworks and the measurement of laser frequencies with a mode-locked frequency comb", *IEEE J. Quantum Electron.*, Cilt 37, Sayı 1493, 2001.