

UME'DE PRİMER FREKANS STANDARDI KURULMASI İÇİN SÜRDÜRÜLEN ÇALIŞMALAR

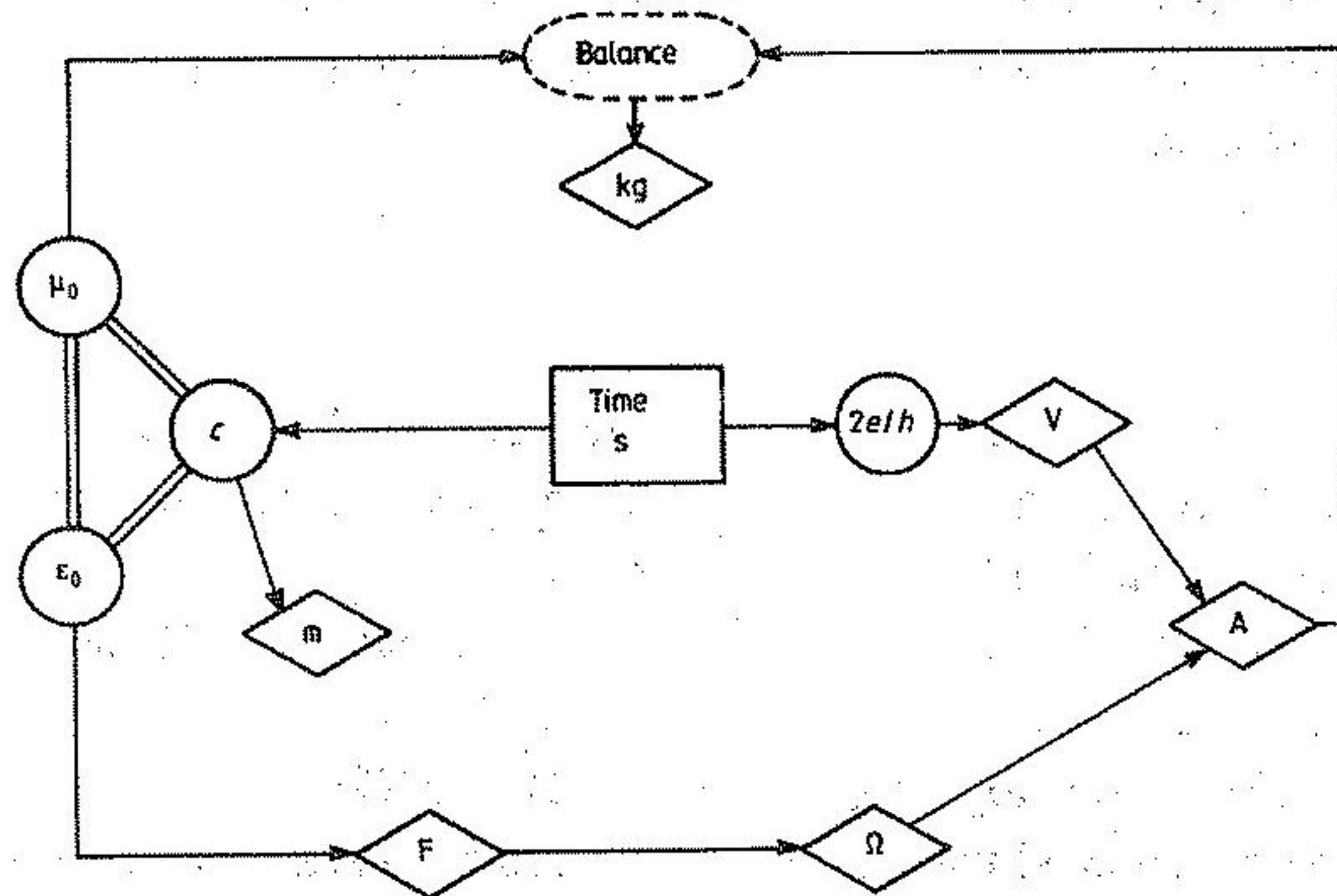
Ramiz GAMİDOV, İsmail TAŞKIN, Mustafa ÇETİNTAŞ, Vladimir SAUTENKOV
Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), TÜBİTAK, PK.21 41470, Gebze-KOCAELİ

Özet

Sezyum (Cs) birincil frekans standartlarının doğruluğu (10^{-13} - 10^{-14}) atomların hızına ve mikrodalga frekansını belirleyen enerji seviyelerinde bulunan atomların sayısına bağlıdır. Bu parametrelerin iyileştirilmesi için dünyada başlatılan çalışmaları göz önüne alarak, laboratuvarımızda laser ışığı ile Cs atomlarının hızının azaltılması (atomların soğutulması) ve atom fıskiyesi prensibine dayanan mikrodalga frekans sisteminin kurulması için çalışmalar başlatılmıştır. Şu anda laboratuvarımızda Cs atomlarının enerji geçitlerine kilitlemiş olan dış kaviteli diyot laser sistemleri kurulmuştur. Bu lazerlerin fiziksel parametrelerinin frekansa olan etkisi araştırılmış ve en iyi kararlılıklarının 6×10^{-13} olduğu ölçülmüştür. Bu lazerler optik frekans standardı olmakla beraber, aynı zamanda Cs atomlarının laser ile soğutulmasında kullanılacaktır. Atomların laserler ile soğutulması ve atom fıskiyesi oluşturulması için gereken diğer sistemlerin kurulması çalışmaları sürmektedir.

1. Giriş

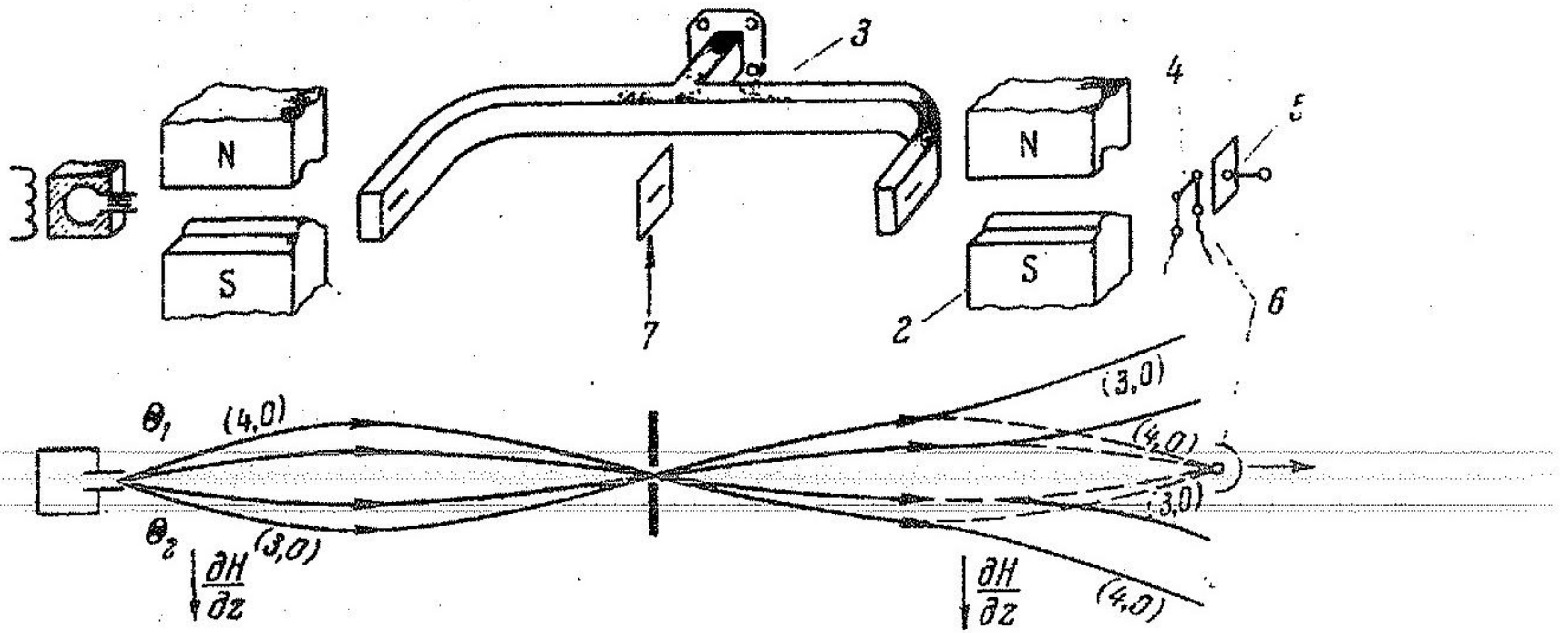
Metrolojide zaman ve frekans ölçümü en doğru ölçüm işlemidir. Bu nedenle başka birimlerin daha yüksek doğrulukla ölçülebilmesi, frekans ölçülmesi yoluyla yapılmaya çalışılmaktadır (Şekil.1). Bunun yanında havacılık, uzay ve savunma sistemleri için büyük önem taşıyan zaman koruma sistemlerini iyileştirmek için teknolojisi gelişmiş ülkeler zaman ve frekans standardı sistemlerini kurmuştur ve geliştirilmesi için yapılan çalışmaları desteklemektedir. Bu bilimsel ve teknik sebepler zaman ve frekans standartlarının doğruluğunun daha da artmasını gerektirmektedir [1-5].



Şekil.1

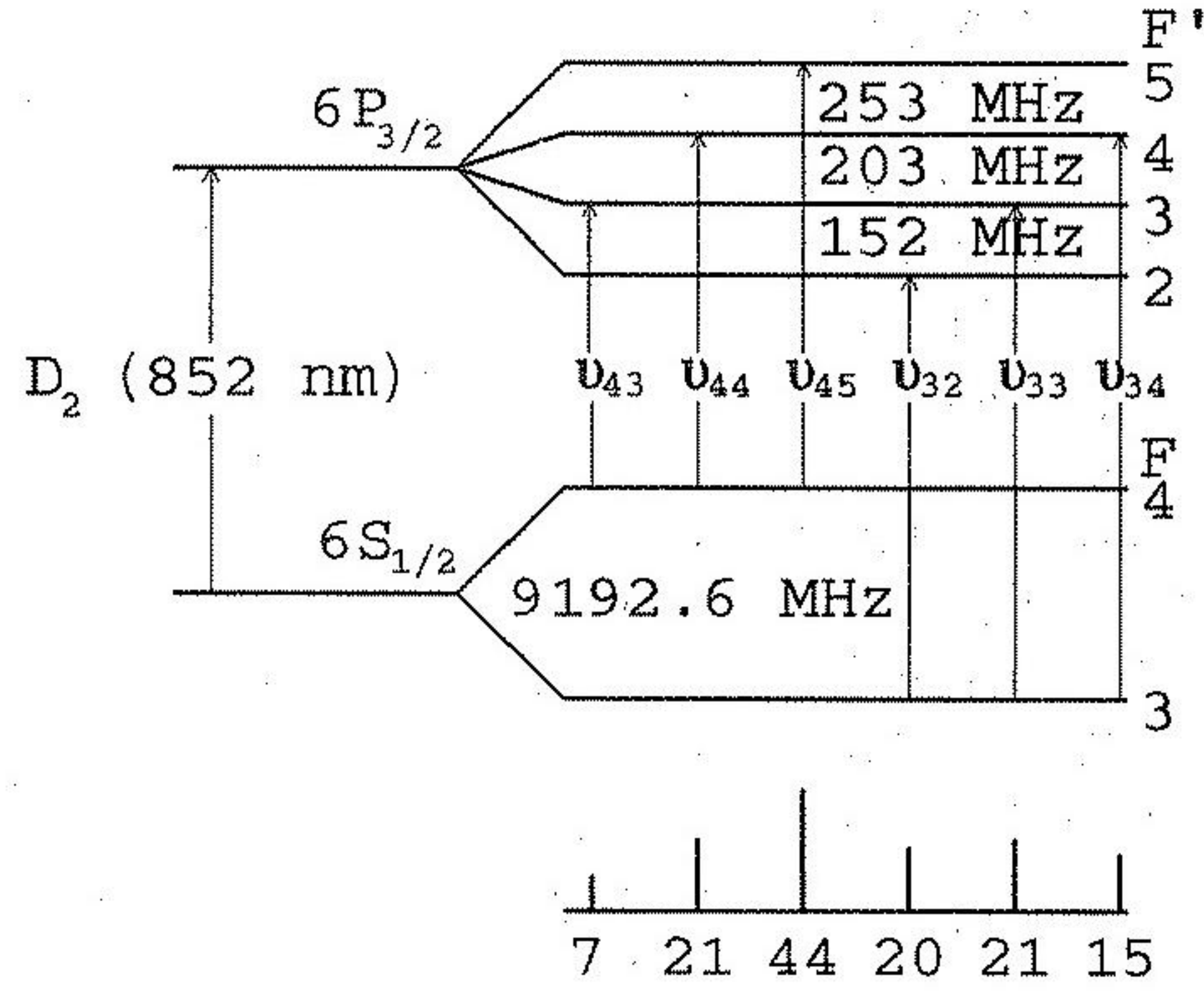
Zaman birimi saniye ile diğer birimlerin ilişkisi.

Atomik zaman ve frekans standartlarının temeli elektromanyetik dalga üreten osilatörün frekansının, atomların (Cs, Rb vb.) enerji geçitlerine kilitlenmesine dayanır. Bu kilitlenme ise osilatörün, atomların enerji geçitleriyle belirlenen ve frekansı daha kararlı elektromanyetik dalga üretmesini sağlar. Bilindiği gibi bu dalganın belli sayıdaki periyodu ile saniyenin tanımı gerçekleştirilir. Böyle çalışan atomik zaman ve frekans standartlarının doğruluğu ve kararlılığı genelde iki faktöre (osilatörün ve atomik sistemin parametreleri) bağlıdır. Benzer quartz osilatörler kullanılarak ve lazerlerle atomların hareket yönlerini ve hızlarını değiştirerek, saniyeyi belirleyen enerji geçidindeki sayılarını artırarak yeni tip atomik frekans standartları oluşturulmaktadır [1-5]. Şu anda birincil standart olarak kullanılan Cs atomik frekans standardı (AFS) için en uygun dizayn geçmiş 40 yıllık gelişme sonucu en iyi şekilde yapılmıştır. Cs AFS' nin blok şeması Şekil.2'de gösterilmiştir. Atom demeti, sıcaklık kontrollü fırından termal yayının şeklinde elde edilir. Fırından çıkan atomik demette, temel enerji ($6S_{1/2}$) seviyesinin bütün (16) Zeaman (m_F) geçişlerindeki ($6S_{1/2}(F=3;4, m_F)$) atomlar mevcuttur (şekil 3). Bu atomlardan sadece $F=3, m_F=0$ ve $F=4, m_F=0$ geçişlerinde olanlar seçici magnet ile Ramsey rezonatorünün içerisine gönderilir. Rezonatorün içine gönderilmiş bu atomlardan mikro-dalga ile etkileşime girenler rezonatorün çıkışındaki seçici magnet aracılığı ile dedektöre gönderilir. Dedektördeki sinyal ise quartz jeneratörün atomların $6S_{1/2}(F=3, m_F=0) - 6S_{1/2}(F=4, m_F=0)$ geçişinde kilitlenmesi için kullanılır. Cs fırının sıcaklığı 350 K ve rezonatorün uzunluğu ise birkaç metredir. Sonuç olarak Cs atomik demeti ve manyetik selektörler temeline dayanan klasik Cs frekans standartlarının doğruluğu $10^{-13} - 10^{-14}$ civarındadır.



Şekil.2 Cs atomik frekans standartlarının blok şeması.

AFS' nin doğruluk ve kararlılığının artırılması için en uygun hale getirilmesi gereken esas parametrelerden biri dedektördeki spektral sinyalin $S(\nu)$ gürültüye olan oranı (S/N) ve spektral kalınlığıdır ($\Delta\nu/\nu$). Sinyalin spektral kalınlığı $\Delta\nu$ ise atomların rezonatorün içinden ne kadar zamana $\Delta\nu \sim (1/\Delta t)$ geçmesine bağlıdır. Başka ifade ile atomla elektromanyetik



Şekil.3 Cs atomlarının D_2 enerji seviyeleri.

dalganın etkileşme süresi artarsa doğruluk artar. Buna göre sezyum primer AFS'lerin boyu birkaç metre (1÷3 m) olmuştur. Bu ise başka problemler yaratmaktadır.

Atomların resonatörün içerisinde kalma süresini artırmak için uygulanan farklı bir yöntem ise atomların lazer ışığı ile soğutulması (300 K'dan 1 μ K'e kadar) ve hızının azaltılmasıdır. Fırından çıkan atomların hareketinin ters yönünde lazer ışığı göndererek hızlarını saniyede 300 metreden 3 cm'ye kadar azaltmak mümkündür. Bu ise hem küçük ölçülü ($L < 1$ m) hem de yüksek doğruluklu ($\Delta\nu/\nu \sim 10^{-16}$) AFS oluşturulmasını sağlayacaktır. Bu tür AFS'ler dünyada pek çok laboratuvarlarda kurulmaktadır ve en iyi sistem ise LPTF'de (Fransa) çalışmaktadır [5]. Soğuk sezyum fışkıyesi prensibine dayanan AFS'nin kararlılığı $\sigma(\tau) = 5 \cdot 10^{-13}/(\tau)^{1/2}$ olup, beklenen doğruluk ise 10^{-14} 'den daha iyidir.

UME Zaman ve Frekans Laboratuvarı'nda ticari olarak satın alınan Cs atomik saatleri ile mikrodalga zaman ve frekans standardı sistemi kurulmuş, BIPM TAI klübüne üye olunarak hem kendi zaman skalamız oluşturulmuş olup, hem de izlenebilirlik sağlanmıştır. Bunun yanı sıra laboratuvarımızda, diğer gelişmiş ülkelerin metroloji merkezlerinde olduğu gibi, doğruluk derecesi bu standartlardan daha iyi olabilecek yeni bir primer frekans standardının geliştirilmesi çalışmaları başlatılmıştır. Böyle bir standardın oluşturulması için gereken en önemli kısım atomların hızını azaltacak Cs atomlarının enerji geçitlerine kilitlemiş, frekans kararlılığı çok yüksek olan lazerlerin hazırlanmasıdır. Şu anda UME'de gereken bu lazer sistemleri hazırlanmış, frekans kararlılıkları ölçülmüştür ve standardın kurulması için gereken teknik ve bilimsel çalışmalar devam etmektedir.

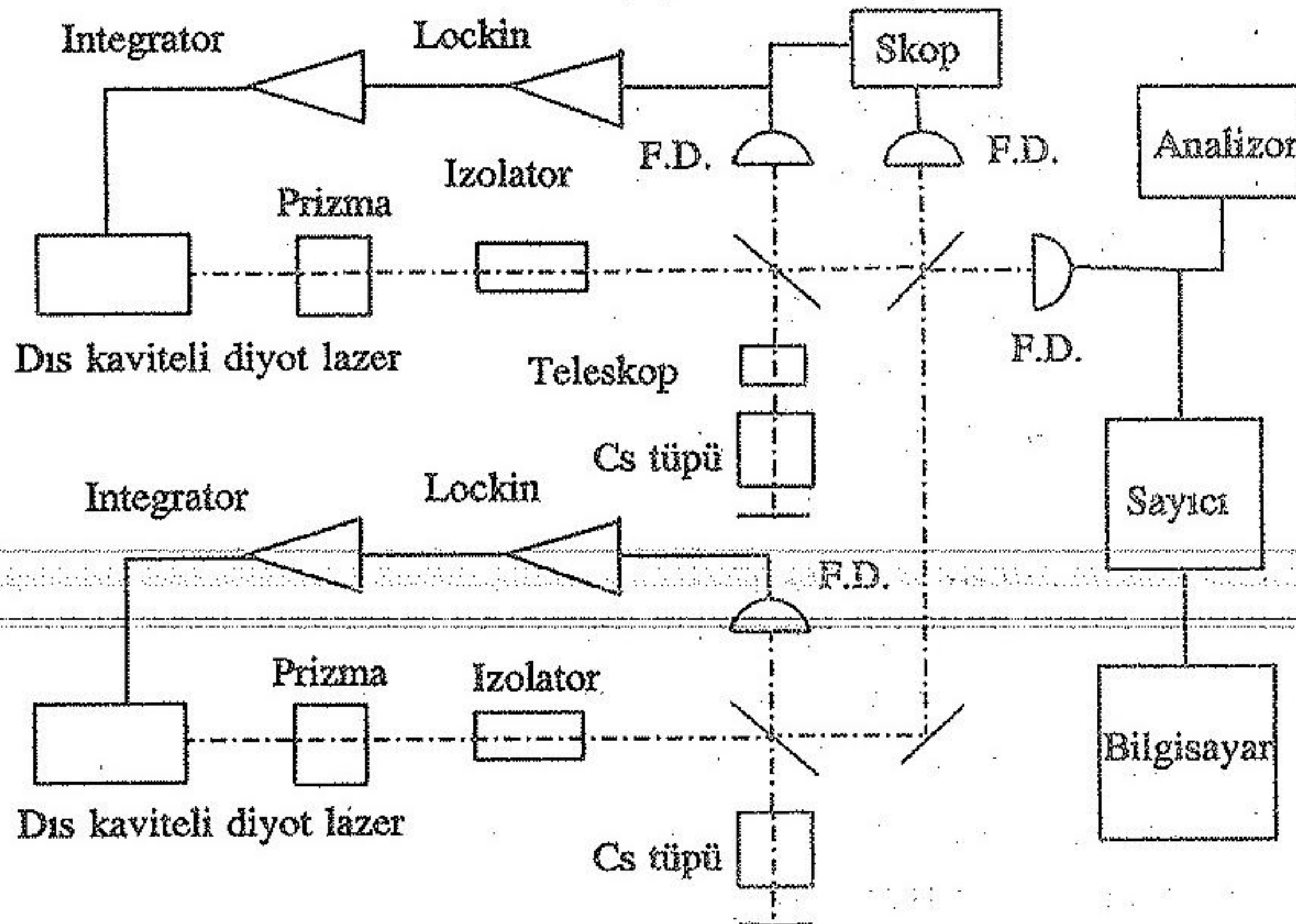
2. Cs Atomlarının D_2 Enerji Geçitlerine Kilitlenmiş Diyot Lazer Sistemi

Özellikle son 10 yıl içinde diyot lazerleri teknolojisindeki hızlı gelişmeler hem spektrumun farklı bölgesinde ince bantlı ve güçlü lazerlerin üretimini, hem de atomik

geçitlere kilitlenmiş optik frekans standartları oluşturulmasına olanak vermiş ve bunların fizik, metroloji ve teknolojinin farklı alanlarında kullanımını hızlandırmıştır [6-8].

Metroloji deneylerinde sürekli olarak kullanılan lazerler genelde dış rezonatörlü diyot (external cavity diode laser, ECDL) lazerlerdir. Seçici dış rezonatörün kullanımı genelde spektral bandı $\Delta\nu_{DL} \sim 5 \div 10$ MHz olan diyot lazerlerin ECDL durumunda çalışırken bandının $\Delta\nu_{ECDL} \sim (1/L)^2 * \Delta\nu_{DL}$ ye kadar azalmasını sağlar. Burada "l" diyot lazerin resanotor boyu, "L" dış rezonatör boyudur. Bu ise ECDL'lerin ürettiği elektromanyetik dalganın spektral bandının atomik gazların enerji geçişlerindeki frekans belirsizliğinden çok daha az olmasını sağlar.

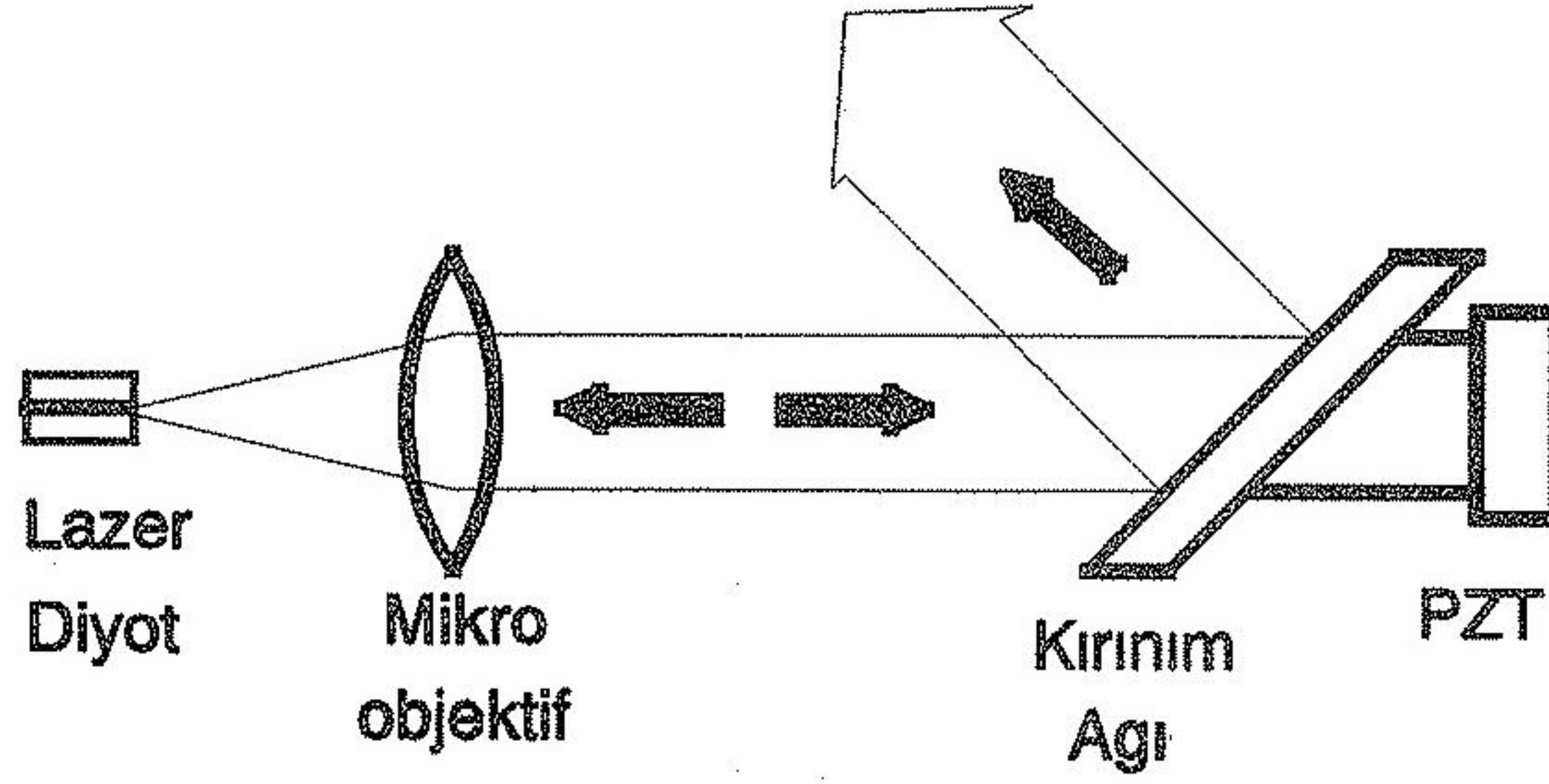
Laboratuvarda dış kaviteli diyot lazerler Cs atomlarının, D_2 enerji geçidinde kilitlenerek, frekansın kararlılığı ve lazer ışığının parametrelerinin (polarizasyonu, çapı, şiddeti) frekans değerine olan etkisi ölçülmüştür. Deney düzeneğinin blok şeması Şekil.4'te gösterilmiştir. ECDL, Littrow geometrisi tipinde dizayn edilmiş olup, diyot lazer, mikro-objektif ve piezoseramik (PZT) üzerine monte edilmiş kırınım ağından (grating) oluşmaktadır (Şekil.5). Diyot lazerin (SDL-5410) sıcaklığı sıcaklık kontrol sistemi ile ± 10 mK kararlılığı ile sabit tutulur. Diyot lazeri mikro-objektifin odak noktasına yerleştirerek 0.1 mrad'dan iyi olan paralel ışık demeti 1 mm de 1200 kafesi olan kırınım ağının üzerine düşer. Kırınım ağından yansıyan birinci ışık demeti yeniden diyot lazere gönderilerek lazerin çalışması sağlanır. Kırınım ağından yansıyan sıfırıncı ışık demeti ise ECDL den çıkış ışığı olarak kullanılır. Diyot lazerin akımı (1 GHz/mA) ve sıcaklığı (0.3 nm/C⁰), dış kavitenin boyu (0-0.5 μ m) değiştirilerek ECDL frekansı sezyum atomlarının D_2 enerji geçişlerine ayarlanır.



Şekil.4

Cs atomlarının enerji geçitlerine kilitlenmiş dış kaviteli diyot lazerlerin deney düzeneği.

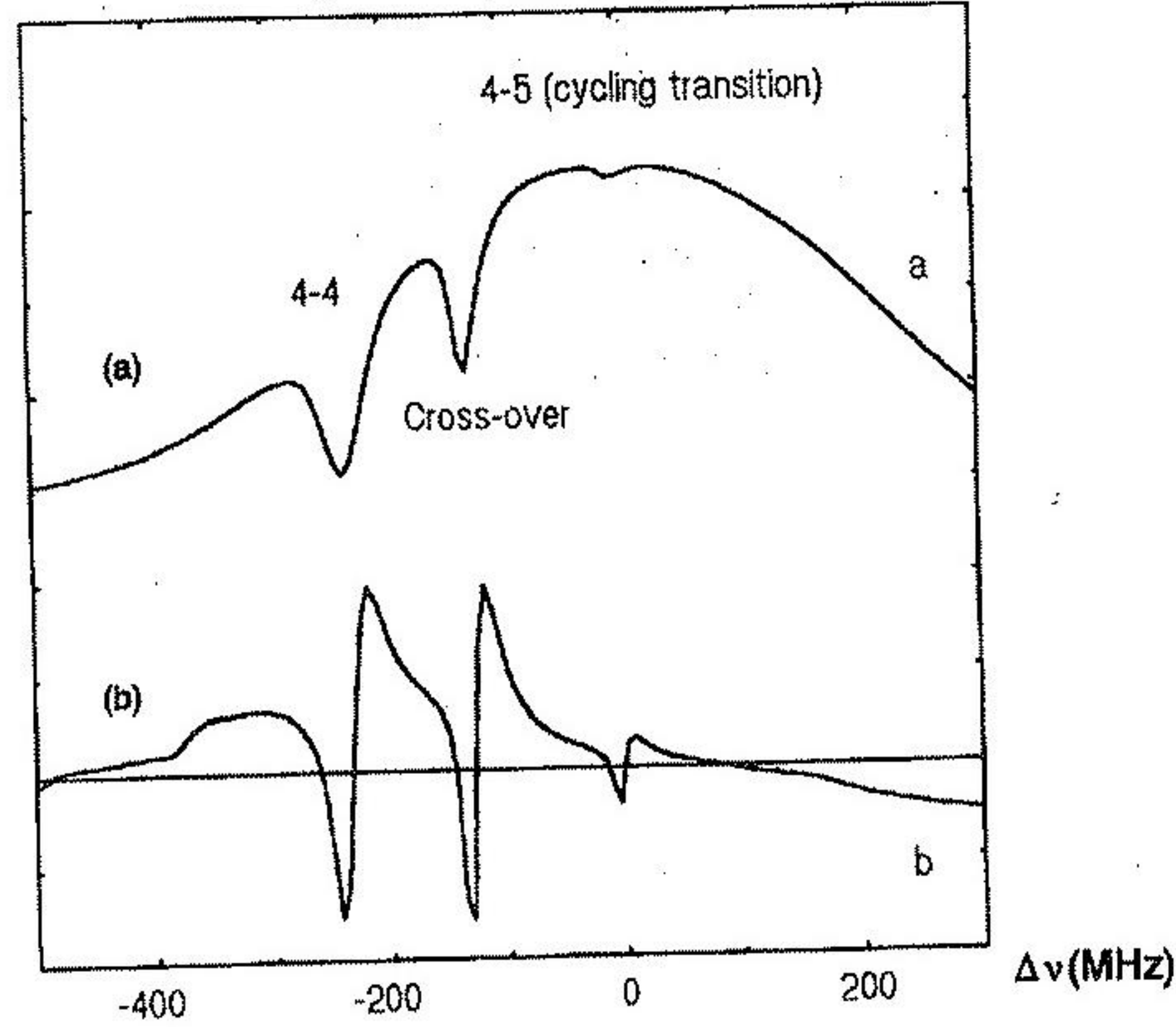
Lazer ışığını içinde Cs gazı olan ($n=3 \times 10^{10}$ atom/cm³) cam tüpün (boyu ve çapı 3 cm, sıcaklığı 21 °C) içine gönderilerek duran dalga yaratılır. Geri yansıyan ışık algılanarak atomların yutma spektrumu ölçülür. Dış manyetik alanın etkisini azaltmak için Cs tüpü manyetik ekran içine yerleştirilmiştir.



Şekil.5 Dış kaviteli diyot lazerlerin optik şeması.

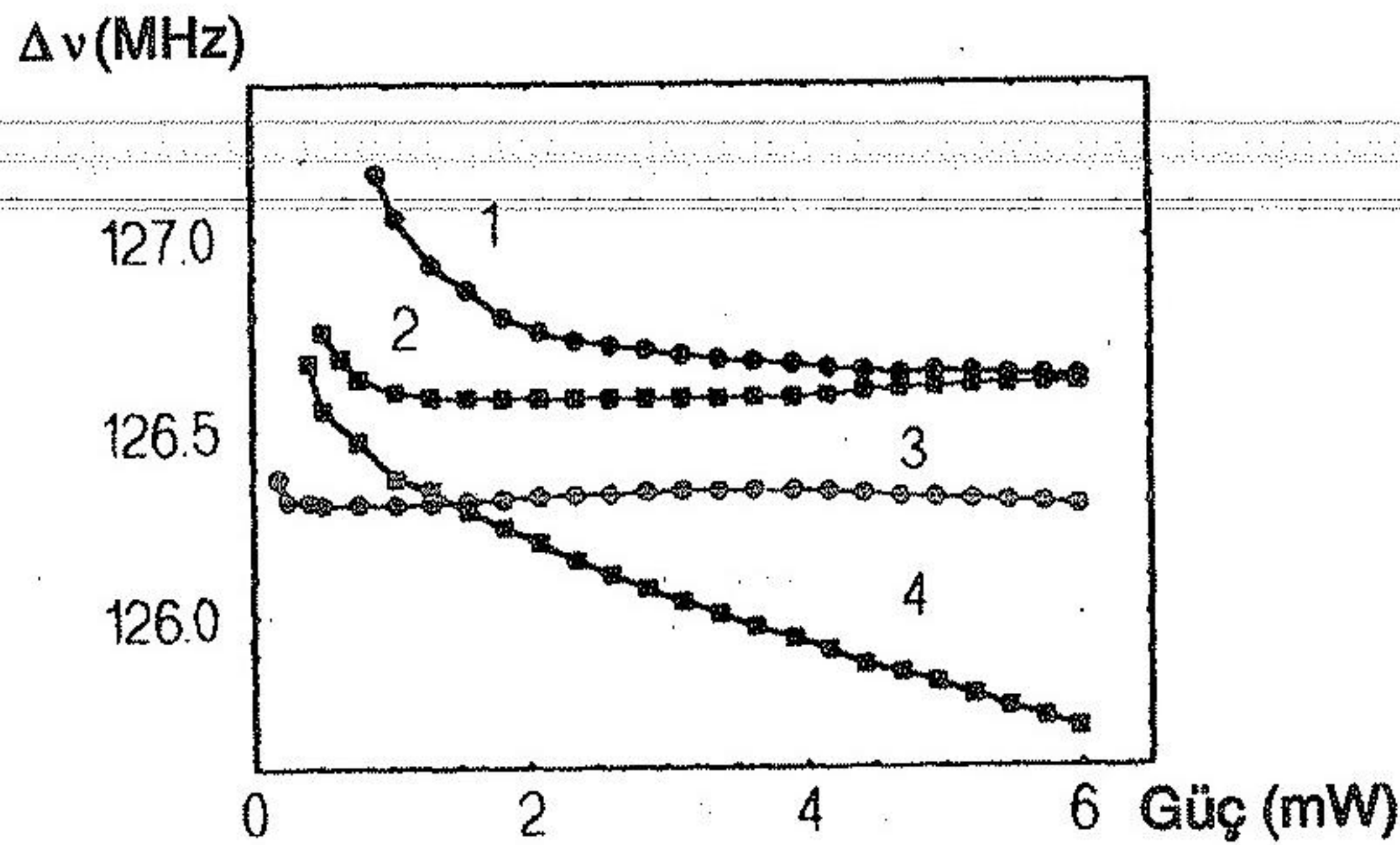
Lazerin frekansı yaklaşık 20 kHz de module edilerek ve Lock-in amplifier + integratörden meydana gelen servo sistem kullanılarak, ECDL'in frekansı referans Fabri-Perot interferometrenin iletim rezonansına kilitlenir. Bu interferometrenin boyunu değiştirerek lazerin frekansını Cs atomlarının yutma frekansı etrafında taramak mümkündür. İkinci bir lock-in amplifier sistemi kullanarak yutma spektrumunun birinci türevini kaydetmek mümkündür. Cs atomlarının yutma spektrumu Şekil.6(a)'da ve spektrumun birinci türevi de Şekil.6(b)'de gösterilmiştir. Bu rezonansların şekli incelendiğinde, rezonansların simetrik olmadığı gözükmemektedir. Bunun sebebi, atomların Zeeman enerji seviyelerindeki optik pompalanma olayı ve lazerin ışık basıncının etkisi ile atomların hareket yönünün değişmesi gibi fiziksel etkilerinin yutma spektrumunu deforme etmesi ile ilgilidir. Bu fiziksel etkiler ise Cs atomlarıyla etkileşmeye giren lazer ışığının parametrelerine (polarizasyonu, şiddeti, çapı) bağlıdır [9-10]. Bunu daha iyi incelemek için birinci lazer Cs atomlarının $6S_{1/2}$ ($F=4$) - $6P_{3/2}$ ($F=5$) geçişlerine denk gelen "Doppler-free" rezonansına (ν_{45}), ECDL-2 ise $(\nu_{45} + \nu_{44})/2$ rezonansına kilitlenmiştir. Böylece iki lazer arasındaki frekans farkı yaklaşık 126 MHz sağlanmış olur. İkinci lazerin parametreleri sabit tutularak, birinci lazerin gücü, polarizasyonu ve çapı değiştirilmesi yoluyla lazerlerin fark frekansının bu parametrelere bağımlılığı incelenmiştir. Işığın değişik çap ve polarizasyonlar için lazerlerin fark frekansının birinci lazerin gücüne bağımlılığı Şekil.7'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi ışığın çapının büyümesi fark frekansın artmasına (0.5 MHz/cm) yol açmaktadır. Bunun sebebi lazer ışığının basıncı ile atomların hızındaki değişimdir. Farklı polarizasyonlardaki değişim ise atomların Zeeman enerji seviyelerinde pompalanması ile ilgilidir [9-10].

Sezyum frekans standartlarında kullanılan, Cs atomlarının enerji geçitlerine kilitlenmiş diyot lazerlerin frekans değerinin lazerin gücündeki değişimlerden etkilenmemesi büyük önem taşımaktadır. Çünkü, lazerin frekansındaki herhangi bir değişim standardın doğruluğunu ve kararlılığını negatif yönde etkiler. Bunun için deneylerimiz sonucunda fark frekansının, lazerin gücündeki değişimden en az etkilendiği optimum parametreler bulunmuştur. Şekil.7'deki 2

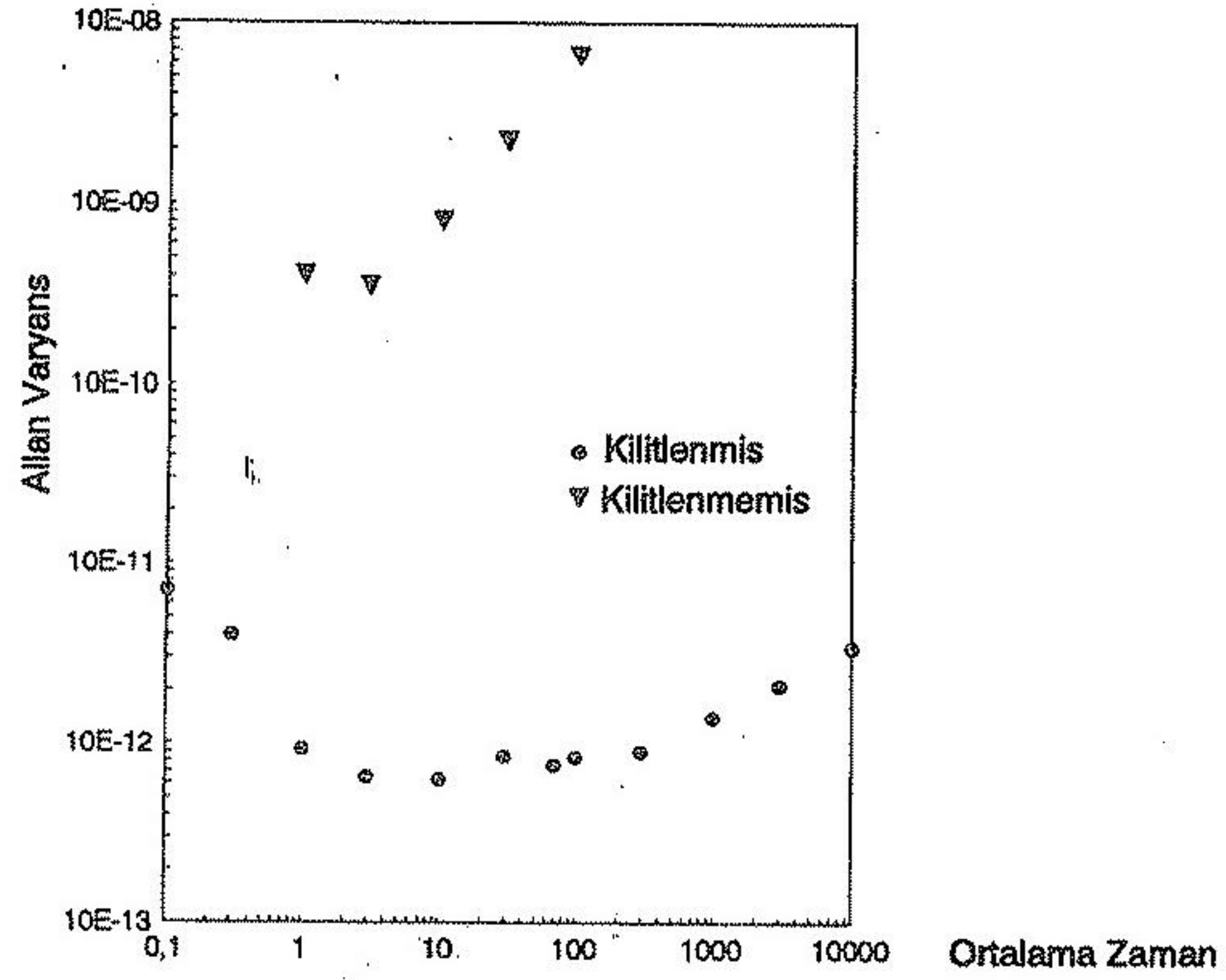


Şekil.6 (a) Cs atomlarının yutma spektrumu, (b) spektrumun birinci türevi.

numaralı eğriden görüldüğü gibi çapı 1 cm olan ve doğrusal polarizasyonlu duran dalganın gücündeki değişim lazerin frekansının güce bağımlılığını en aza indirgemektedir. Bu optimum koşullarda lazerin frekans kararlılığı spektrum analizör, evrensel sayıcı ve bilgisayar ile standard Allan varyansı istatistik hesabı metodu ile ölçülmüştür [1-2]. Şekil.8'de lazerin atomların enerji geçidine kilitlememiş ve kilitlemiş durumdaki frekans kararlılığının ortalama zamana bağlı grafiği gösterilmiştir. Ölçümler sonucunda, lazerin atomların enerji geçitlerine kilitlemeden önceki kararlılığı 4×10^{-10} olurken, kilitledikten sonraki kararlılığının ise 6×10^{-13} olduğu görülmüştür.



Şekil.7 Laser gücüne göre fark frekansı: 1- R=1 cm, σ polarizasyon, 2- R=1 cm, π polarizasyon, 3- R=0.4 cm, π polarizasyon, 4-R=0.4 cm, σ polarizasyon.



Şekil.8 Dış kaviteli diyot lazerlerin atomik geçide kilitlemiş ve kilitlememiş durumdaki frekans kararlılıkları.

3. Sonuç

En iyi kararlılığı 6×10^{-13} olan dış kaviteli diyot lazer sistemi kurulmuş ve optik pompalama, lazer basıncı gibi fiziksel olayların yutma spektrumuna etkisi incelenmiştir. Bu fiziksel olayların Cs atomunun D_2 enerji geçidine kilitlemiş lazerlerin frekansına etkisi ölçülmüştür ve frekansın lazerin gücüne en az bağlı olduğu koşullar bulunmuştur. Bu tür lazerler Cs atomlarının soğutulması ve Cs atom fıskıyesi prensibine dayanan AFS'nin kurulması çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. Bunun yanısıra yüksek frekans kararlılıklı bu lazerler optik frekans standardı olarak kullanılabilirdiği gibi, metrolojinin diğer alanlarında da (uzunluk, küçük yerdeğişimleri vs.) kullanılabilirler

KAYNAKLAR:

- [1]. C.Thomas, P.Wolf, P.Tavella; Time Scales, BIPM, Monographic 94/1,1994
- [2]. J.Vanier, C.Audoine; The quantum physics of atomic frequency standards, Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1986
- [3]. E.de Clercq, G.D.Rovera, S.Bouzig, A.Clairon; IEEE transactions on Instrumentation and Measurement V.42, N.2, 1993
- [4]. K.Gibbl, S.Chu; Metrologia, V.29, p.201-212, 1992
- [5]. Special issue on selected papers CPEM/94, IEEE transactions on Instrumentation and Measurement. V.44, No.2, 1995.
- [6]. G.H.B. Thompson, Physics of Semiconductor Laser Devices. John Wiley and sons, 1980
- [7]. Massimo Inguscio and Richard Wallenstein, Solid State Lasers, New Developements

- and Applications. Nato Asi Series, series B, Physics V.317,1993
- [8]. R.W. Fox, C.S. Weimer, L.Hollberg, C.S.Turk
Spectrochimica Acta Rev. Vol.15, No.5, pp. 291-299, 1993
- [9]. R.Gamidov, A.C. İsmailov, H. Uğur
Optics and Spectroscopy, vol.77, pp. 6-10, January 1994.
- [10]. R.Gamidov, İ.Taşkın and V.Sautenkov
In Proc.Int.Freq.Contr.Symp.IEEE (FCS), 31 May - 2 June 1995,
San-Fransisco, USA.