

# HE-NE/I<sub>2</sub> LAZER KULLANILARAK TÜRK DALGABOYU STANDARDININ OLUŞTURULMASI

Madlen Erin, Igor Malinovsky, Alexander N. Titov

TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), P.K. 21, 41470 Gebze/Kocaeli

**Özet :** Bu kongrede, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde, He-Ne/I<sub>2</sub> kullanılarak yapımı gerçekleştirilmiş olan ulusal dalgaboyu standardı hakkında bilgi verilecek, elde edilen sonuçlar bilginize sunulacaktır.

## 1. Giriş

Bilim, teknoloji ve endüstride geniş çapta kullanılan ve en yüksek doğruluğa sahip ölçüm tipi olması nedeniyle, yüksek duyarlıklı (hassas) uzunluk ölçümleri birincil seviyede önem taşımaktadır. Bu amaçla Türkiye'nin Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde ilk aşama olarak, birincil seviye dalgaboyu kaynakları geliştirilerek uzunluk standardının gerçekleştirilmesi kararlaştırılmıştır. Uzunluk standardının gerçekleştirilmesi, gauge block (master blokları) ölçümlerinin hassas bir şekilde yapılması, line standartları (cetvel) kalibrasyonu ve dalgaboyu karşılaştırmaları için vazgeçilmez olacaktır.

Uluslararası Ölçü ve Ayarlar Konferansının (CIPM) tavsiyesi ve metrenin yeni tanımına uygun olarak, birincil seviye dalgaboyu standardı olarak, zaman ve frekans standardı olan sezyum standardı ile frekansı karşılaştırılmış olan, lazer standardı kullanılabilir. İyot molekülündeki hyperfine enerji geçişleri kullanılarak doymuş soğurum (saturated absorption) tekniği ile kararlı hale getirilmiş ve 633 nm'de ışınım yapan He-Ne lazer, diğerlerine nazaran daha basit, ucuz ve güvenilirliği yüksek olduğundan uzunluk standardı olarak seçilmiştir. Frekansının doğruluğunun, kararlılığının ve yeniden üretilebilirliğinin yeteri kadar yüksek olması, yüksek doğruluklu enterferometrik uzunluk ölçümleri için büyük yarar sağlamaktadır. Bu yüzden bu tip bir standard, birçok ülkenin ulusal uzunluk standardı laboratuvarlarında, birincil seviye dalgaboyu standardı olarak kullanılmaktadır. 1,5 yıllık bir çalışma sonucunda, frekansı iyot ile kararlı hale getirilmiş He-Ne lazer kullanılarak Türk ulusal dalgaboyu standardı tamamlanmış ve bu çalışmalar sonucu  $3 \times 10^{-14}$  mertebesinde bir frekans kararlılığı ve  $10^{-12}$  den daha iyi bir frekans tekrarlanabilirliği elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler, şimdiye kadar bu tip lazer standardı ile elde edilmiş en iyi değerlerdir. Lazer standardımız, Almanya'daki PTB ve Fransa'daki BIPM kuruluşlarının birincil seviye lazer standartları ile karşılaştırılmış ve BIPM tarafından sertifikalandırılmıştır.

## 2. UME lazer standardının özellikleri

UME'nin He-Ne/I<sub>2</sub> lazer standardı, daha önce dünyanın başka ülkelerinde yapılmış benzerleri gözönüne alınıp tavsiye edilmiş parametreler kullanılarak, nispeten basit ve taşınabilir lazer standardı tiplerinin optimizasyonu ile oluşturulmuştur. Bunlar yapılırken daha kararlı ve güvenilir bir standart elde etmek amacıyla standardın bazı kısımlarında geliştirmeler yapılmıştır. Frekans ölçümlerinde kullanılan beat frekansı tekniği, uluslararası karşılaştırmalar yapmaya da olanak sağlayan hızlı ve elverişli bir yoldur (Şekil 1).

Lazer standardının tasarımı, 20 mm çapında 4 invar çubuk ve nispeten ağır alüminyum levhalardan oluşan lazer çerçevesi hariç, BIPM ve PTB'deki standartlara benzer şekilde yapılmıştır. Aynaların ayarları ve oynamayacak şekilde sabitlenmeleri, küçük eğimli invar vidalar ve nispeten geniş alüminyum kenarlarla sağlanmıştır.

Deşarj tüpü, toplam uzunluğu 220 mm, deşarj uzunluğu ise 130 mm olan Carl-Zeiss Jena marka ticari bir He-Ne tüpüdür. 2,4 Torr'luk bir basınç altında He-Ne karışımı ile doldurulmuş bu cam tüp yaklaşık olarak 5 mA ve 2 kV DC ile çalışır. Başlangıçta 10 kV civarında bir kıvılcım uygulamak gerekir (ignition).

İyot hücresi (iodine cell), toplam uzunluğu 120 mm olan ve yeteri uzunlukta soğuk uca sahip ticari olarak mevcut Hellma GmbH marka cam tüptür ve PTB'de doldurulmuştur. Her iki taraf, yüksek kaliteli Brewster penceresine sahiptir. Lazer ışığının frekansı, iyot spektrumundaki frekans bileşenlerinden birisine kilitlenmektedir (Şekil 2). Amaç, frekansın kilitli kalmasını sağlamaktır ve bunu gerçekleştirmek için servo kontrol sistem kullanılmaktadır. Bu sistem üzerinde yapılan çalışmalar sırasında yapılan ölçümlere göre, oda sıcaklığının  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 'lik olası değişimlerine karşın, soğuk ucun alt kısmına yakın bölümde sıcaklık kararlılığı, tüpün içinde 0.5-1 mK bölgesinde kalmaktadır.

Kavite (iki ayna arası uzunluk) parametreleri, BIPM'dekininki benzeri olarak seçilmiştir. Deşarj tüpü tarafında yarıçapı 60 cm olan küresel ayna, iyot hücresi tarafında ise düzlem ayna (yarıçapı =  $\infty$ ) vardır ve her ikisinin yansıma katsayısı % 99 dur. Rezonatörün boyu 375 mm'dir ve rezonatör, boyuna moda (TEM<sub>00</sub>) çalışır.

Lazer standardının kararlılığı, servo-kontrol sistem yardımıyla sağlanmaktadır [1]. Lazer standardının servo-kontrol sisteminde, üçüncü harmonik kilitleme tekniği kullanılmaktadır ve bu, sayısal kilitleme kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bunun için ticari olarak mevcut SR850 model lock-in yükseltici kullanılmaktadır. Böylece giriş sinyali, lock-in yükselticide bulunan 18 bit A/D çevirici yardımıyla sayısal sinyale çevrilmekte, bu çevirici ideal doğru kabul edilebileceğinden çıkış sinyali gürültüden etkilenmemektedir. Lock-in yükselticinin bütün fonksiyonları matematik işlemcisi tarafından yapılmaktadır. Bu durum, sistemde oluşabilecek kaymaları kaldırmayı mümkün kılmaktadır. Üçüncü harmonik tekniği kullanılırken  $\omega$  frekanslı sinüs dalga ile lazer ışığı modüle edilmekte ve modüle edilmiş lazer ışığı faz duyarlı teknikle analiz edilmektedir.  $3\omega$  frekanslı sinyal de referans sinyal olarak lock-in yükselticiye uygulanmaktadır. Amaç, lazerin frekansını, iyodun frekansına kilitlemek ve bu frekansta kilitli kalmasını sağlamaktır. Üçüncü harmonik sinyali burada geribesleme sinyali olarak kullanılmaktadır. Sistemde iki çevrim bulunmaktadır. Birinci çevrim ışık algılayıcı, bant geçiren filtre, lock-in yükseltici, lag-lead filtre ve yüksek gerilim geniş bantlı yükselticiden oluşur. Yüksek gerilim geniş bantlı yükselticinin çıkışları hızlı piezoseramik dönüştürücüye (PZT) uygulanmaktadır. Bu çevrim ile sistemin kararlılığı sağlanmakta ve nispeten hızlı frekans değişimleri bastırılmaktadır. İkinci çevrim, girişi lock-in yükselticinin çıkışına bağlı entegratör ile yüksek gerilim dar bantlı yükselticiden oluşur. Yüksek gerilim dar bantlı yükselticinin çıkışları yavaş fakat hassas PZT'ye bağlanmıştır. Bu çevrim, laboratuvarındaki yavaş sıcaklık değişimlerini kompanse eder. Her iki PZT, aynalara yapışık durumdadır. Bu iki ayna rezonatörü oluşturmaktadır. Frekansın kararlılığını koruması, bu iki ayna arası mesafenin sabit tutulması ile mümkün olmaktadır. Servo-kontrol sistem yardımıyla frekans kararlılığı sağlanmaktadır.

Sisteme uygulanacak modülasyon sinyali saf sinüs olmalıdır; lock-in yükseltici tarafından üretilen modülasyon sinyalinde 2.,3. ve 4. harmonikler -80 dB oranında bastırılmaktadır. Modülasyon frekansı olarak PZT'nin rezonans frekansı olan 26 kHz kullanılmaktadır. PZT kendi mekanik rezonansında sürüldüğü için 2.,3. ve 4. harmoniklere cevabı çok düşüktür. Bu durum lazer standardının kararlılığının artmasına önemli katkıda bulunmaktadır.

Lazer frekansının değişimi üzerinde rol oynayan etkenlerden en önemlileri lazerin çıkış gücü, iyot basıncı ve modülasyon genişliğidir. Bu parametrelerde oluşacak değişimler lazer frekansının kaymasına sebebiyet verir. Bunlar içinde frekans kaymasına en çok etki eden modülasyon genişliğinin değişmesidir. Bu yüzden modülasyon genişliğinin düşük bir belirsizlikle ölçülmesi kararlılığın artmasına yardımcı olur. Modülasyon ölçümünde kullanılan yeni bir metod, frekans tekrarlanabilirliğini artırmıştır [1]. Modülasyon ölçümü yapılırken sayısal osiloskop kullanılarak modülasyonlu ve modülasyonsuz iki lazer standardı arasındaki beat frekansı kaydedilmekte, daha sonra bu sinyale hızlı Fourier dönüşümü uygulanarak beat frekansı spektrumundaki FM bileşenlerinin genlikleri, teorik olarak hesaplanmış değerlerle karşılaştırılmaktadır (Şekil 3). Böylece spektrum analizör kullanılarak yaklaşık 100 kHz'lik bir belirsizlikle ölçülebilen modülasyon genişliği, sayısal osiloskop ve hızlı Fourier dönüşüm metodu kullanılarak 5 kHz'lik bir belirsizlikle ölçülebilmektedir. Frekans modülasyonlu signal,  $\cos(ft + (\Delta/2\omega)\cos\omega t)$  formülü ile ifade edilebilir. Burada  $f$  taşıyıcı frekans (lazerin frekansı),  $\omega$  modülasyon frekansı,  $\Delta$  modülasyon genişliğidir. UME-L3 lazer için  $f=473\,612\,214,705$  MHz,  $\omega=26,727$  kHz,  $\Delta=6$  MHz(pp)'tir. UME-L3 lazer standardının modülasyon katsayısı 6 MHz modülasyon genişliği için 9,22 kHz/MHz'e eşittir.

Lazer frekansının kararlılığını etkileyen faktörlerden biri de çıkış gücünün kararlılığını sağlamaktır. Bunu sağlamak amacıyla He-Ne tübün deşarj akımı, güç kaynağı tarafından stabilize edilip 3 mA civarındaki deşarj akımının ortalama değeri  $1\ \mu\text{A}$  civarında sabit tutulmaktadır. Bu durum, lazerin çıkış gücüne bağlı olarak frekansının 7,5 Hz civarında ( $1,5 \times 10^{-14}$ ) bir kararlılıkla sabit kalmasını sağlamaktadır. UME-L3 lazer standardının çıkış gücünün frekansa bağımlılığı 112 Hz/ $\mu\text{W}$ 'a eşittir.

İyot hücrenin basıncının sabit tutulması da lazer frekansının kararlılığında önemli bir etkidir. İyot hücrenin sıcaklığı 1 mK'lik bir kararlılıkla 15°C'de sabit tutularak frekansın kararlılığı önemli ölçüde iyileştirilmiştir. UME-L3 lazer standardındaki iyot hücrenin basıncının frekansa bağımlılığı 7,98 kHz/Pa'a eşittir.

### 3. Sonuç

Sonuç olarak UME-L3 lazer standardının süper kararlı oluşunun nedenleri şu şekilde özetlenebilir :

Elektronik offsetin yok sayılabilecek kadar düşük olması.

İyot hücrenin kalitesi.

İyot hücrenin sıcaklığının 1 mK gibi bir kararlılıkla sabit tutulması.

Akım kararlılığı güç kaynağı kullanmak suretiyle çıkış gücünün iyi bir kararlılıkla sabit tutulması.

Sayısal lock-in yükseltici kullanılması.

Nispeten yüksek modülasyon frekansı kullanılması.

Modülasyon sinyalinin saf sinüs oluşu, harmoniklerin yeterli ölçüde bastırılmış olması.  
Modülasyon genişliğinin düşük bir belirsizlikle ölçülmesi.  
PZT'nin kendi mekanik rezonansında sürülmesi.

Uluslararası karşılaştırmalar sonucu lazer frekansının değeri [2]

$$f=473\,612\,214,705\text{ MHz } (\sigma=0,012\text{ MHz})$$

olarak verilmiştir. Burada doğruluk  $2,5 \times 10^{-11}$ 'dir. Frekansın tekrarlanabilirliği, 150 Hz olup bağıl değer olarak  $3 \times 10^{-13}$ 'e karşılık gelmektedir. 20000 saniyelik bir süre için frekans kararlılığı  $3 \times 10^{-14}$  olarak belirlenmiştir.

### Kaynaklar

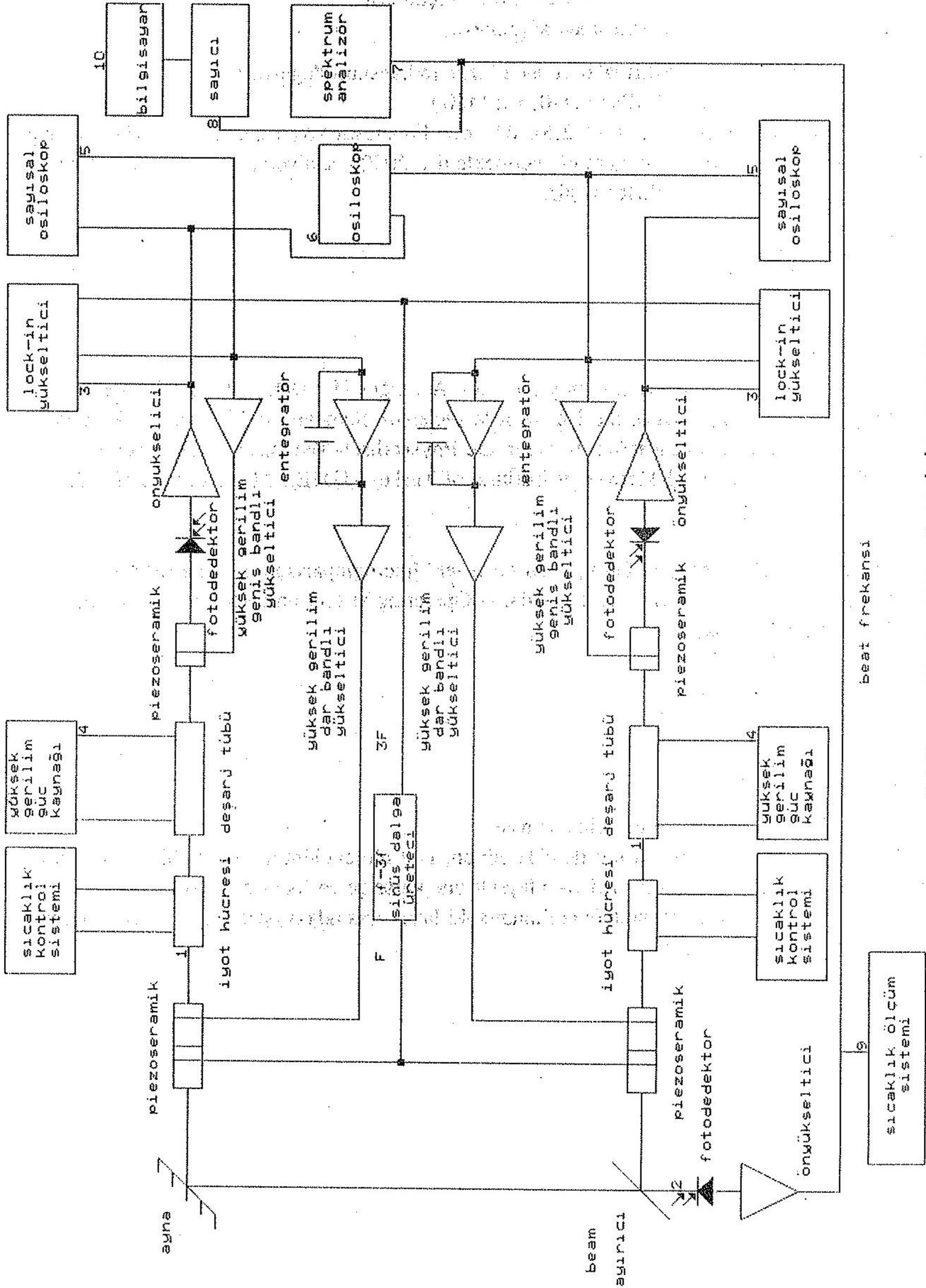
1. Erin M., Karaböce B., Malinovsky I., Titov A., Uğur H., Darnedde H., Riehle F., Progress in Stabilization of the He-Ne/I<sub>2</sub> Wavelength Standard at 633 nm and Results of an International Comparison between the Physikalisch-Technisch Bundesanstalt (PTB) and the National Metrology Institute of Turkey (UME). Metrologia, 1995, 32, 3 (yayınlanacak).
2. M.Erin, I.Malinovsky, A.Titov, J.-M.Chartier, Intercomparison of the BIPM and UME primary laser Wavelength Standards Operating at 633 nm. Metrologia, 1995, 32, 4 (yayınlanacak).

### Şekiller

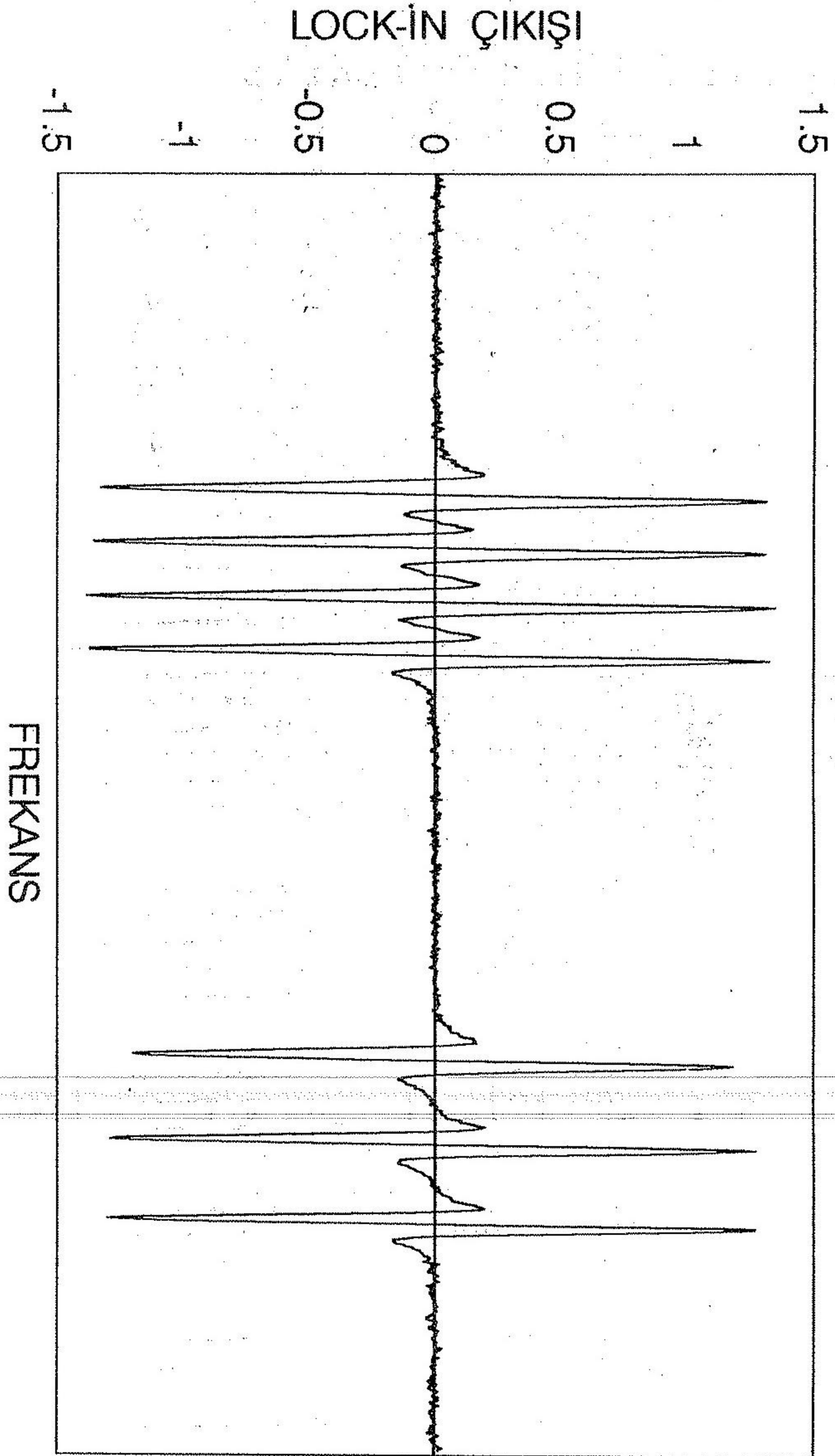
Şekil 1: He-Ne lazer sisteminin blok şeması.

Şekil 2: Üçüncü harmonik tekniği ile elde edilen, iyot molekülünün 100 ms'lik zaman sabiti için alınmış d-,e-,f-,g-,h-,i-,j- bileşenlerine karşı gelen lock-in yükseltici çıkışı.

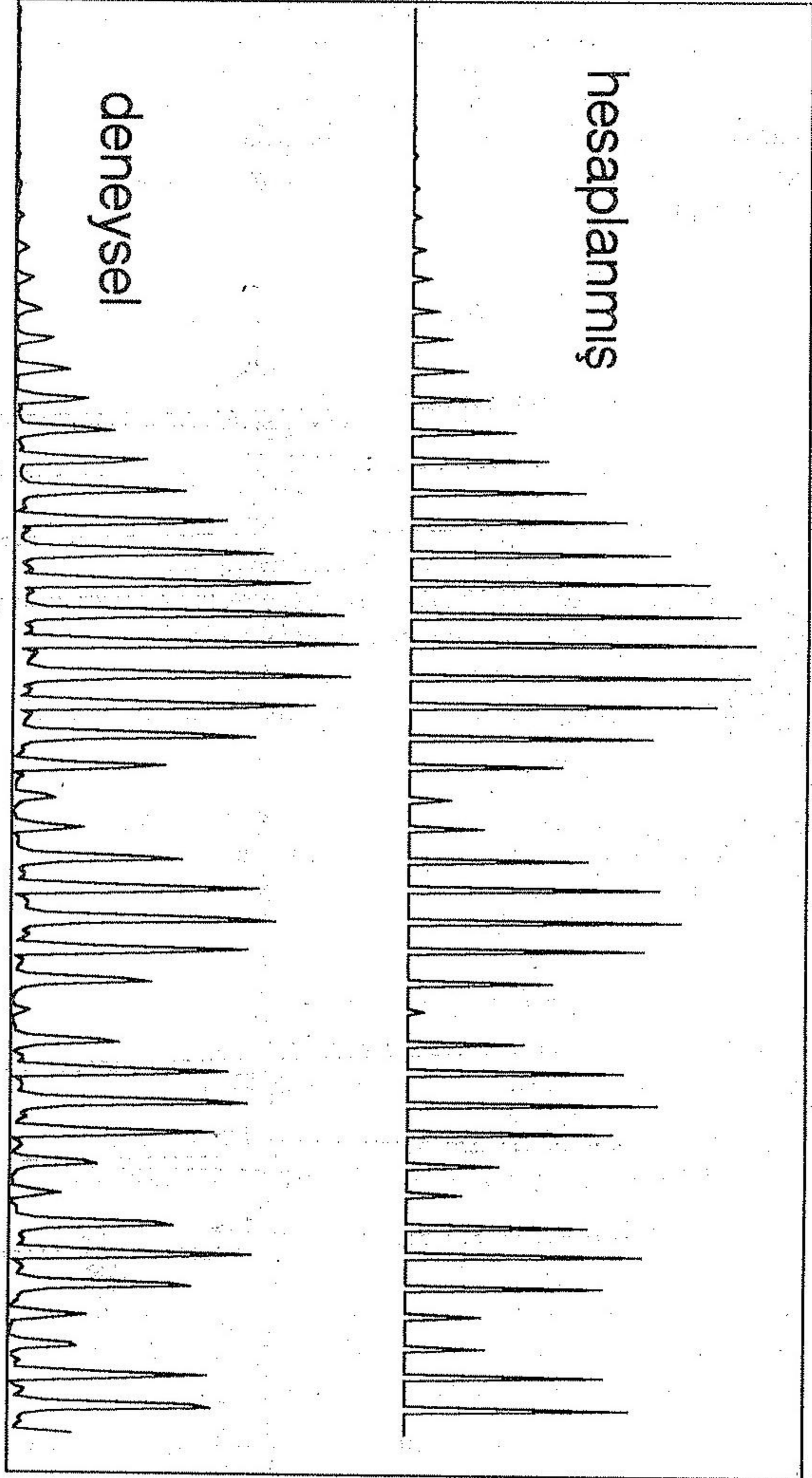
Şekil 3: Modüle edilmiş ve modüle edilmemiş iki lazer arasındaki beat sinyali spektrumunun düşük frekans kısmı.



Şekil 1. HE-NE LAZER SİSTEMİNİN BLOK ŞEMASI



Genlik



Şekil. 3.