

DIŞ KAVİTELİ DİYOT LAZERİYLE KÜÇÜK YERDEĞİŞTİRME ÖLÇÜMLERİ

Ramiz Gamidov, Enver Sadıkhov, Nuray Karaböce, Mustafa Çetintaş, Vladimir Sautenkov
Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME), TÜBİTAK, P.K. 21,41470, Gebze, Kocaeli

Özet

Aktif lazer yöntemi ve dış kaviteli diyot lazer (external cavity diode laser, ECDL) kullanarak küçük yerdeğıştirmeler (5-900 nm) ölçülmüştür. Yerdeğıştiren yüzey ECDL'in dış aynası olarak kullanılmış, lazerin frekansındaki değışim ise Fabry-Perot interferometresi ile incelenerek, mutlak $\Delta L=5$ nm ve göreceli $\Delta L/L=3 \cdot 10^{-8}$ seviyesindeki yerdeğıştirme ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

1. Giriş

Günümüzde lazerler fizik, metroloji ve teknolojinin çeşitli alanlarında uzunluk ve küçük yerdeğıştirme ölçümlerinde kullanılmaktadır. Buna örnek olarak, uzunluk [1] ve frekans standartlarının [2,3,4] geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar, hız ve titreşim ölçümleri [5,6], gravitasyon dalgaları araştırmaları [7,8] ve jeofizikte, yer küresinin deformasyonunun incelenmesi [9,10] gösterilebilir. Çok düşük seviyeli teknik dalgalanmalara sahip lazerlerin ve elektromanyetik dalgaların istatistik ve fluktuasyon parametrelerini algılayabilecek kadar çok hassas fotodedektörlerin geliştirilmeleri lazerlerin bu tür uygulamalarda kullanılmasına neden olmaktadır [11].

Genellikle lazerlerle küçük yerdeğıştirme ölçümü iki yöntemle (pasif ve aktif) gerçekleştirilir. Pasif yöntemde (bu yöntem bilimsel terminolojide interferometrik yöntem olarak adlandırılır), lazer bir ışık kaynağı olarak kullanılır. Lazer ışığı interferometrik sisteme gönderilir ve interferometredeki yerdeğıştirmelerden dolayı doğan çıkış ışığın parametrelerinin değışimleri ölçülür. Örneğin, Michelson interferometresi ile yapılan ölçümlerde interferometrenin çıkışında oluşan girişim saçakları incelenmekle interferometrenin kolundaki yerdeğıştirmeler hesaplanır. Michelson interferometresi için minimum yerdeğıştirme değeri aşağıda gösterilen ifade ile bulunur.

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{\min} = \frac{\lambda}{L} \frac{1}{4\pi} \frac{\sqrt{\Delta\nu_n \Delta f}}{\Delta\nu_n(\eta-1)} \quad (1)$$

Bu ifadede, L interferometrenin ΔL kadar değışen kolunun uzunluğu, λ lazerin dalgaboyu, $\Delta\nu_n$ lazerin doğal çizgi genişliği, $\Delta\nu$ lazerin kavitesinin frekans aralığı, η lazer ışığı şiddetinin eşiğı aşma oranı, Δf lazer kavitesinin çizgi genişliğidir. He-Ne lazeri için $\Delta f=10^2$ Hz, $\eta=3$ olduğu halde, minimum göreceli yerdeğıştirme değeri $(\Delta L/L)_{\min}=10^{-14}-10^{-15}$ olabilir. Dış kaviteli diyot lazer (external cavity diode laser (ECDL)) için ise, $\Delta\nu=10^3$ Hz, $\Delta f=10^2$ Hz,

$\Delta\nu_r=10^9$ Hz, $\eta=10$ değerleri için $(\Delta L/L)_{\min}=10^{-13}-10^{-14}$ seviyesindedir. Yerdeğiştirmenin mutlak değeri ΔL , 1 cm uzunluğunda interferometrenin kolunun ölçümlerinde 10^{-8} cm, 8.5 m uzunluğundakinde ise $10^{-12}-10^{-13}$ cm [11] olarak ölçülmüştür.

Daha küçük yerdeğiştirmelerin ölçümleri Michelson interferometresi yerine Fabry-Perot interferometresi kullanılarak gerçekleştirilebilir [12]. Böyle sistemlerde ölçülebilir minimum yerdeğiştirme değeri foton gürültüsü,

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{\min, \text{foton}} = \frac{1-R}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda c h \Delta f}{P}} \quad (2)$$

($\lambda=1 \mu\text{m}$, $P=1 \text{ mW}$, $\Delta f=100 \text{ Hz}$, $R=0.998$ değerleri için $(\Delta L/L)_{\min, \text{foton}} = 10^{-16}$)

lazer ışığı şiddetinin doğal gürültüsü

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{\min, \Delta P} = \frac{1-R}{2\pi} \frac{\lambda}{L} \frac{\sqrt{\Delta\nu_n \Delta f}}{\Delta\nu_r (\eta-1)} \quad (3)$$

(He-Ne lazeri için $(\Delta L/L)_{\min, \Delta P} = 10^{-17}-10^{-18}$, ECDL için ise $10^{-16}-10^{-17}$, dir) ve kullanılan lazerlerin ışık frekansının spektral bant genişliği

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{\min, \Delta\nu} = \frac{\sqrt{\Delta\nu_n \Delta f}}{\nu} \quad (4)$$

(He-Ne lazer için $\Delta\nu=0.01 \text{ Hz}$ $(\Delta L/L)_{\min, \Delta\nu} = 10^{-15}$, ECDL için ise 10^{-12} , dir) ile sınırlanmaktadır. Son ifadelerde R lazer kavitesinde kullanılan aynanın yansımaya katsayısıdır.

İnterferometrik ölçümlerinde yüksek Q-faktörlü interferometreler lazer frekansındaki değişimin (lazerin kararlılığı) etkisini azaltır.

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{Q} \frac{\delta\nu}{\nu} \quad (5)$$

Bu ifadede, $Q=2\pi L/\lambda(1-R)$ -interferometrenin kalitesini gösteren parametredir. Örneğin, $R=0.99$ ve $L=10 \text{ cm}$ ve $\lambda=1 \mu\text{m}$ olduğu halde $Q=10^7$ 'dir. Böylece, özel interferometrik yöntem (kombinasyonlu interferometreler) kullanarak, $(\Delta L/L)=10^{-13}$ seviyesinde ölçümler istenildiği takdirde, lazerin kararlılığı 10^{-6} mertebesinde olması yeterlidir.

Pasif yerdeğiştirme ölçüm yöntemlerinden farklı olarak, aktif lazer yönteminde lazer sadece ışık kaynağı olarak kullanılmakla kalmayıp, aynı zamanda yerdeğiştiren yüzey lazer kavitesinin ikinci aynası gibi kullanılır. Böylece, yüzeyin yerdeğiştirmesi lazer kavitesinin boyutunu değiştirir, dolayısıyla lazer ışığının frekansı değişir. Frekanstaki değişimin ölçülmesi bilindiği gibi metrolojide en doğru olarak ölçülebilen büyüklüktür [13]. Dolayısıyla, böyle bir yöntemin küçük yerdeğiştirme ölçümlerinde kullanılması daha umutvericidir. Bazı durumlarda, yerdeğiştiren yüzeyin yansımaya katsayısı düşük olması (interferometrelerde

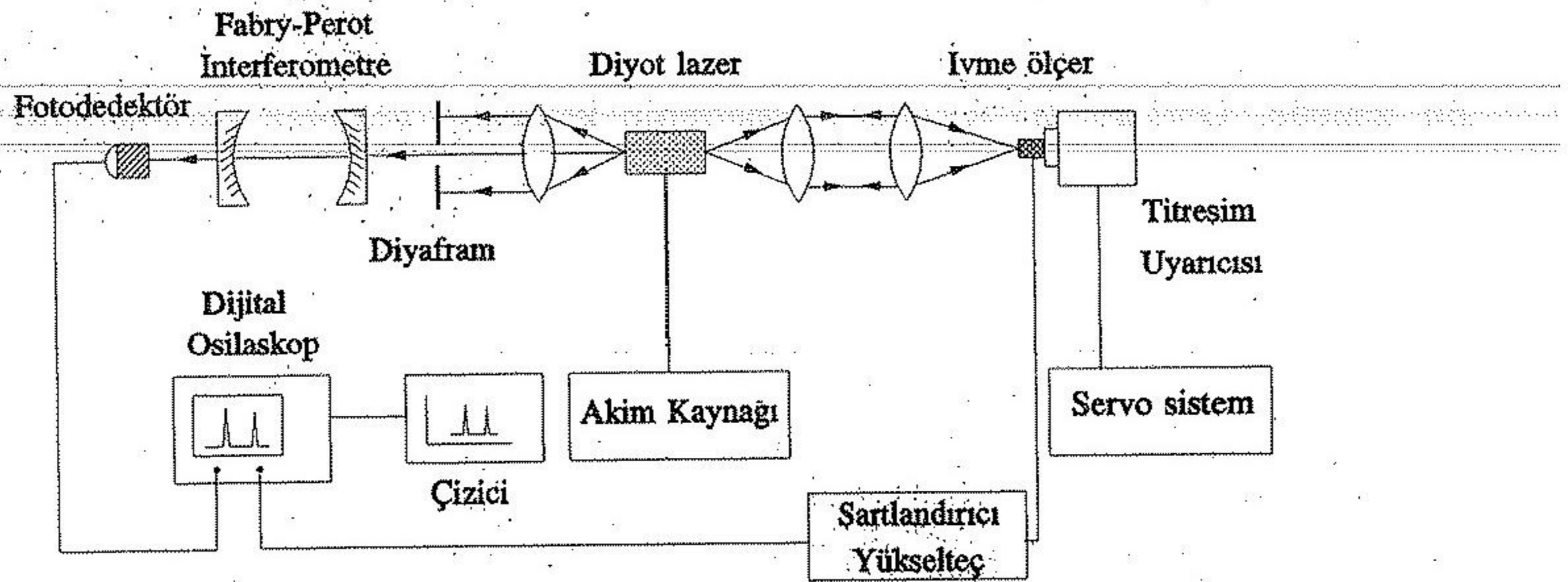
kullanılan $R=0.99$ 'a sahip olan aynalardan farklı olarak) ve bu yüzeylere aynanın yapıştırılmaması talebi, aktif lazer yönteminin kullanılmasında sınırlayıcı faktörlerdir. Ancak, bilindiği gibi dış kaviteli diyot lazerlerin çalışması için lazerin ikinci ayna olarak kullanılan dış aynanın (diyotun değil) yansımaya katsayısının $R=0.001$ olması yeterlidir [14].

UME, Akustik ve Titreşim Laboratuvarında ivme ölçerlerin kalibrasyonu için yerdeğiştirme ölçümlerinde Michelson interferometresi kullanılır. Bu interferometrede, ışık kaynağı olarak ticari He-Ne lazeri ($\lambda=633$ nm) kullanılmaktadır. Yukarıda bahsedilen çok küçük yerdeğiştirmeler seviyesinden farklı olarak, mevcut sistemin yerdeğiştirme ölçümlerindeki çözümüme $\Delta L=\lambda/2=316$ nm ve $(\Delta L/L)=10^{-7}$ 'dir. Bu sınır değer, deney düzeneyindeki titreşimler, özellikle ivme ölçeri uyarma amacıyla kullanılan titreşim uyarıcısından belirlenir.

Bu makalede, biz aktif lazer yöntemi kullanarak UME, Zaman ve Frekans Laboratuvarında dış kaviteli diyot lazeriyle küçük yerdeğiştirme ($<\Delta L=100$ nm) ölçümleri ile ilgili deney sonuçlarını sunmaktayız.

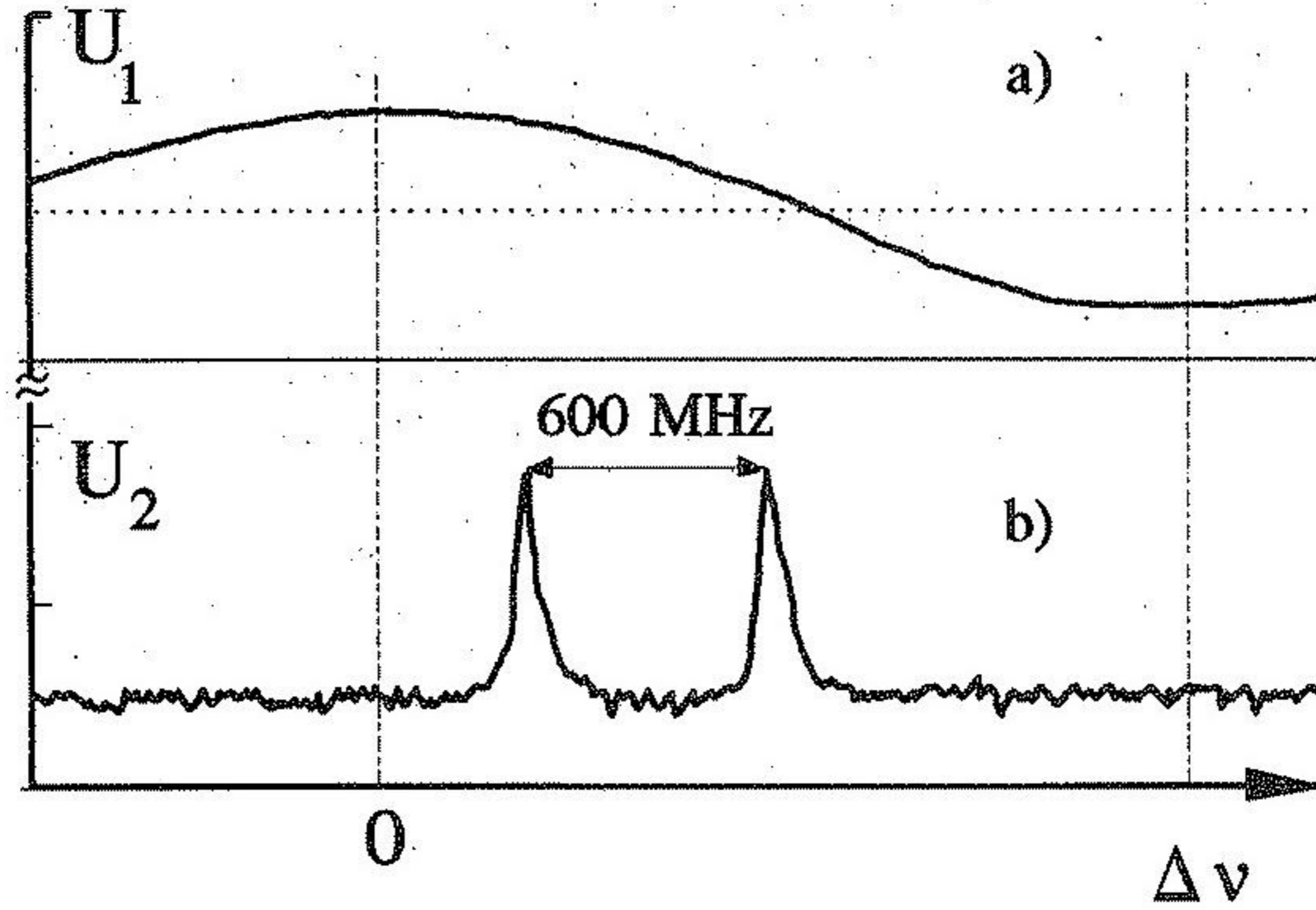
2. Deney Düzeneyi ve Ölçüm Sonuçları

Deney düzeneyinin blok-şeması Şekil 1'de gösterilmiştir. Deneyde, dalgaboyu 852 nm'li SDL-54-10 AlGaAs lazeri kullanılmıştır. Diyot lazerinin ışığı mikroobjektifler aracılığıyla ivme ölçerin üzerine odaklanmıştır. Bu optik sistem (diyot lazer-mikroobjektif-ivme ölçer) öyle ayarlanmıştır ki, ivme ölçerin yerdeğiştiren yüzeyi ECDL'nin dış aynası olarak kullanılmaktadır. İvme ölçer (Brüel & Kjaer tip 8305) titreşim uyarıcısı vasıtasıyla ECDL'nin optik eksenini boyunca ileri-geri hareketlendirilir. Bu olay, lazer kavitesinde ΔL kadar değişim oluşturur, dolayısıyla lazerin frekansını $\Delta \nu$ kadar değiştirir. ECDL'in kavite boyutu 15.5 cm, ivme ölçer yüzeyinin yansımaya katsayısı 0.1'dir. Diyot lazerinin sıcaklığı (21°C) sıcaklık kontrol sistemiyle ± 5 mK doğruluğu ile sabit tutulmuştur. Lazere uygulanan akım 35 mA, lazerin çıkış gücü ise 10 mW'dır. İvme ölçerin yerdeğiştirmesinden doğan lazer frekansının değişimi $\Delta \nu$ dışbükey Fabry-Perot interferometresi aracılığıyla ölçülür. Kullanılan Fabry-Perot interferometresinin rezonansları arasındaki frekans farkının $(c/(4d))=600$ MHz rezonansın çizgi kalınlığına olan oranı 25'dir.

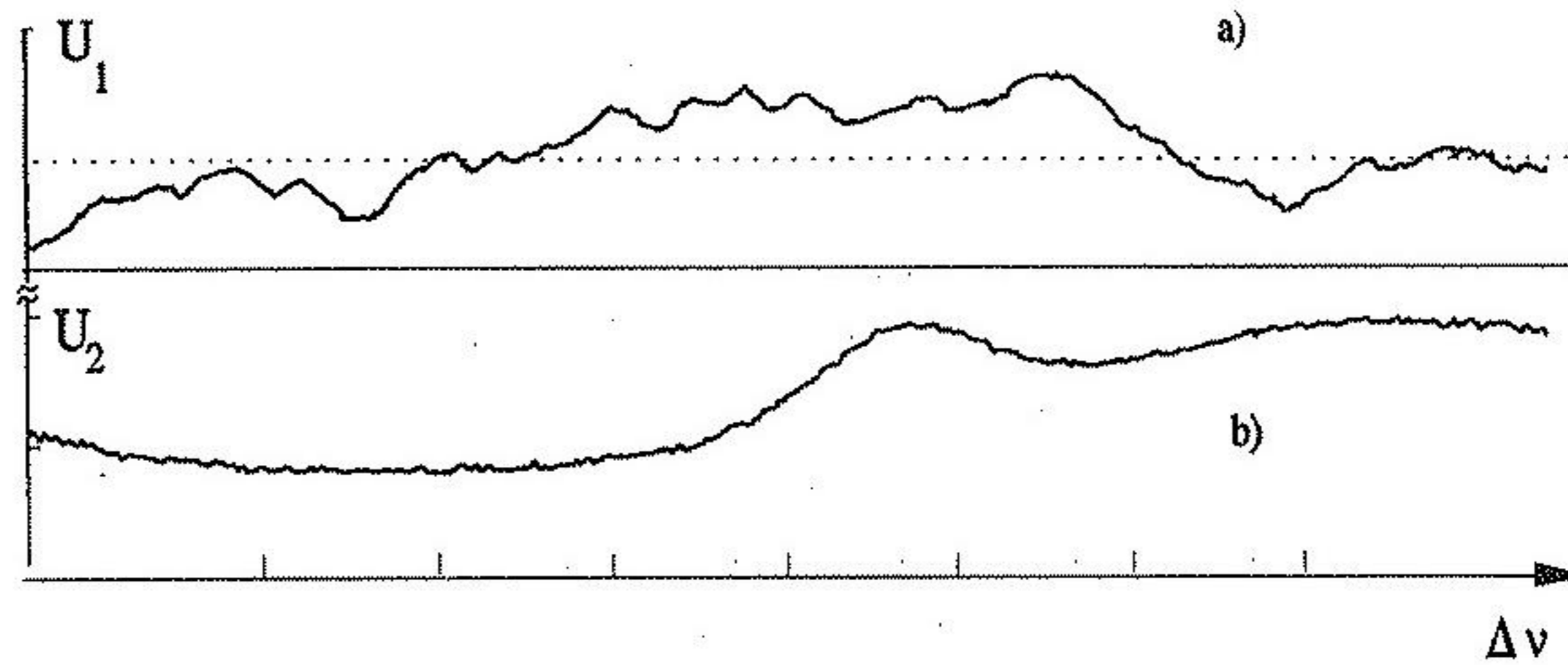


Şekil 1. Deney düzeneyinin blok-şeması

Titreşim uyarıcısına servo sistemden $f=160$ Hz frekansında sinüs şeklinde bir sinyal uygulandığında, ivme ölçerin ileri-geri hareketinin genliği de zamana göre sinüs şeklinde değişir. İvme ölçerin temelini oluşturan piezoseramik kristal (PZT) bu hareket sonucunda yük üretir. İvme ölçerin çıkışındaki yükün lazerin frekansına göre değişimi $U_1(\Delta\nu)$ şartlandırıcı yükselteç (Brüel & Kjaer Tip 2650) aracılığıyla dijital osiloskop ile ölçülür. Dijital osiloskopta, aynı zamanda Fabry-Perot interferometresinden çıkan ışık şiddetinin lazer frekansına göre değişimi $U_2(\Delta\nu)$ kaydedilir (Şekil 2). U_1 maksimum değerden minimuma kadar değiştiğinde lazer kavitesinin boyutu bir yönde, ΔL kadar değişimi ifade etmektedir. Bu ΔL değişim miktarı lazerin frekansının $\Delta\nu = \nu(\Delta L/L)$ kadar değişimine neden olmaktadır. Şekil 2'den görüldüğü gibi, lazerin frekansı dış aynanın hareketinden dolayı $\Delta\nu=2$ GHz değişmiştir. Bu değişim, ivme ölçerin yerdeğiştirmesinin 880 nm olduğunu gösterir. Şekilde görünen iki rezonans Fabry-Perot interferometresinin rezonanslarıdır. Bu iki rezonans arasındaki frekans farkı $600 \text{ MHz} = c/(4d)$ dışbükey interferometrenin aynaları arasındaki mesafe d ile belirlenir.



Şekil 2. ECDL'in frekansının değişimine göre ivme ölçerin elektriksel çıkışı (a) ve Fabry-Perot interferometresinin çıkışındaki ışık şiddetinin (b) değişimi.

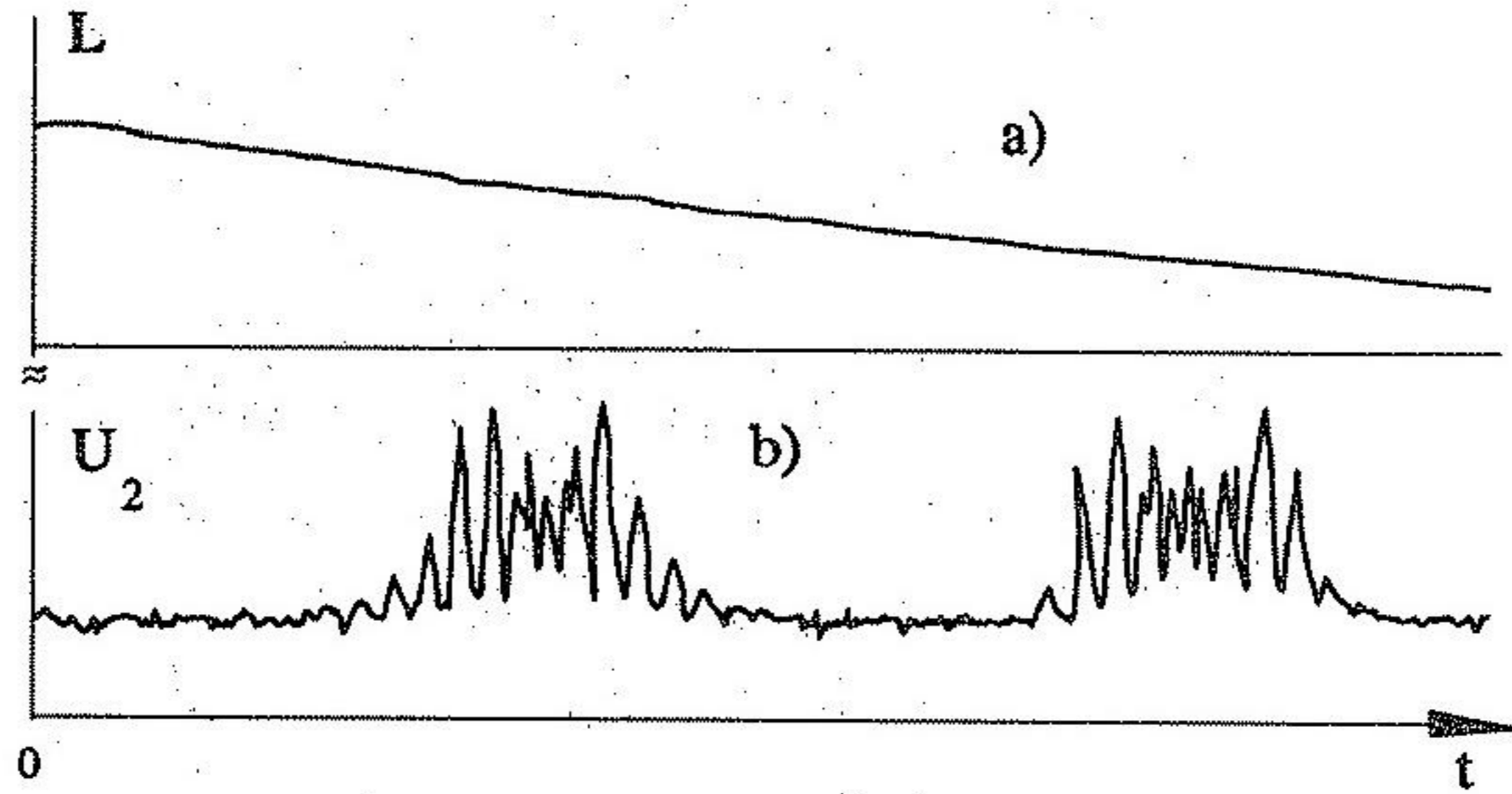


Şekil 3. Titreşim uyarıcısından kaynaklanan gürültüden dolayı ivme ölçerin elektriksel çıkışı (a) ve interferometrenin çıkışındaki ışık şiddetinin (b) frekansa göre değişimi.

Titreşim uyarıcısına uygulanan sinyalin genliğini düşürerek ivme ölçerin daha küçük yerdeğiştirmeleri ölçülmüştür. Ölçülebilecek minimum yerdeğiştirme değeri titreşim uyarıcısından kaynaklanan gürültü (mekanik titreşimler) ile sınırlıdır (Şekil 3).

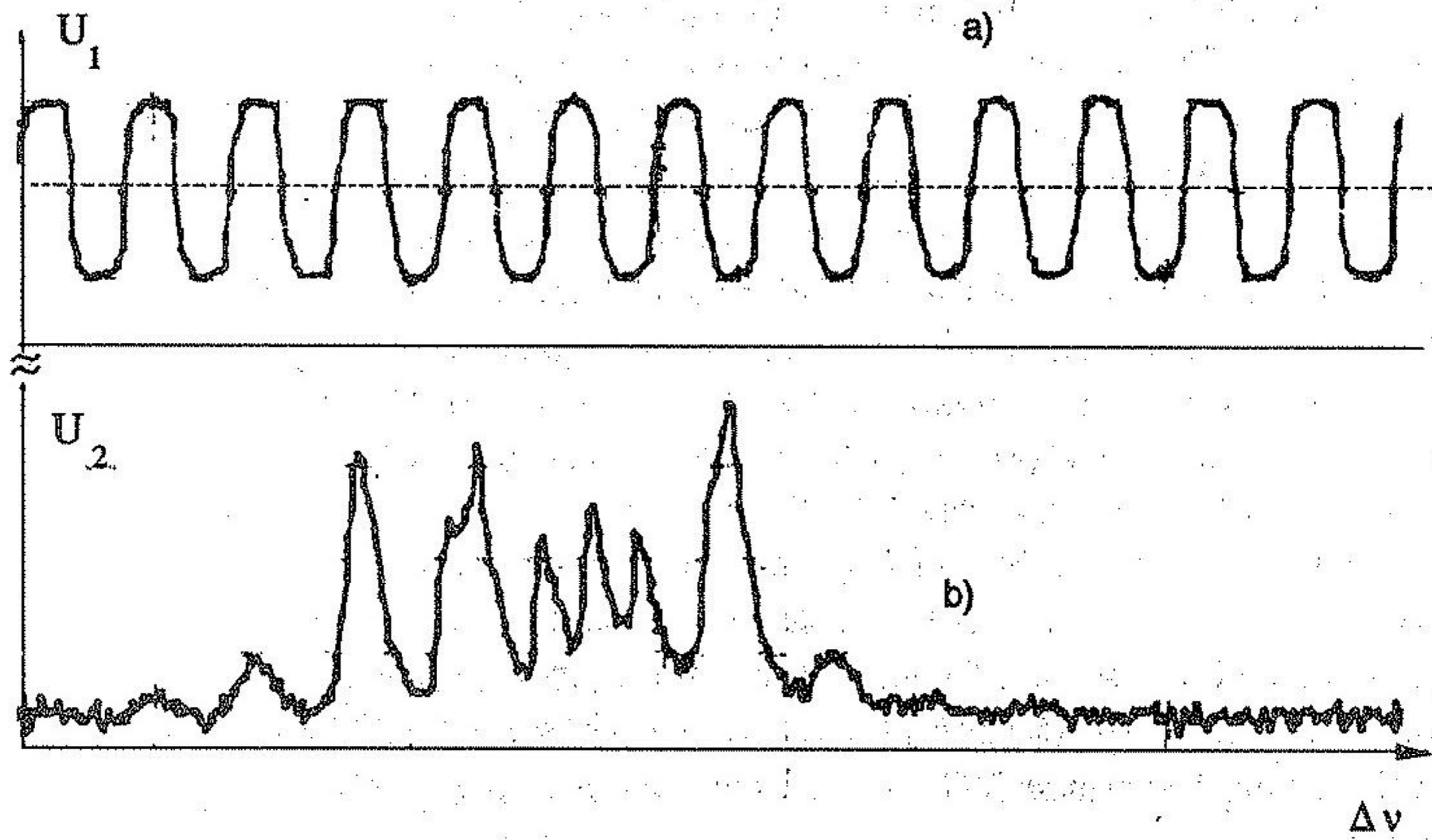
Şekil 3'den görüldüğü gibi, titreşim uyarıcısının gürültüsünden doğan lazer frekansındaki değişim $\Delta\nu=20$ MHz Fabry-Perot interferometresinin çıkışındaki sinyalin minimum değerden maksimuma kadar değişimine neden olmaktadır. Bu ise, titreşim uyarıcısının mekanik titreşiminin genliğinin yaklaşık olarak 9 nm olduğunu gösterir.

Deney sonuçları titreşim uyarıcısından kaynaklanan gürültülerin daha çok düşük frekanslarda ($f < 1$ kHz) yapılan ölçümlerde etkili olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle, titreşim uyarıcısı kullanarak daha küçük yerdeğiştirmeleri ölçmek amacıyla yüksek frekans bölgesinde deney yapılmıştır. Titreşim uyarıcısına uygulanan sinyalin frekansı 3 kHz'e kadar yükseltildi. Lazerin boyutunun değişimini (ivme ölçerin yerdeğiştirmesini) ölçmek için Fabry-Perot interferometresinin boyutu lineer olarak değiştirildi (Şekil 4 (a)) ve interferometrenin iki rezonansı kaydedildi. İnterferometrenin rezonanslarının lazer boyutunun yüksek frekansta değiştiğinden dolayı modülasyona uğradığı görülmektedir (Şekil 4 (b)). Yerdeğiştirme değerinin 80 nm olmasına rağmen, ivme ölçerin elektirksel çıkışı yüksek sinyal/gürültü (S/N) oranı ile kaydedilmiştir (Şekil 5 (a)). Bu ise, düşük frekanslardaki ölçümlerden farklı olarak, yüksek frekans bölgesinde $S/N > 5$ ile 10 nm seviyesindeki yerdeğiştirmelerin ölçüm imkanı sağlamaktadır.



Şekil 4. Fabry-Perot interferometresinin boyutunun (a) ve interferometrenin çıkışındaki ışık şiddetinin (b) zamana göre değişimi.

Yukarıda bahsedildiği gibi, kurulmuş olan bu sistemde titreşim uyarıcısından kaynaklanan gürültüler küçük yerdeğiştirme ölçümlerine engel olmaktadır. Titreşim uyarıcısının kendi yapısından kaynaklanan bu gürültüler genellikle ivme ölçeri titreştirmekte olup, ECDL'in diğer kısımlarını etkilememektedir. Titreşim uyarıcısının olumsuz etkisinden tamamen kurtulmak ve ölçümlerdeki belirsizliği azaltmak amacıyla, ivme ölçer titreşim uyarıcısının yerine bir PZT üzerine monte edildi. PZT'ye servo sistemden 500 Hz frekansında sinüs şeklinde bir sinyal uygulanarak ivme ölçer harekete getirildi. Şekil 6 ve 7'de ivme



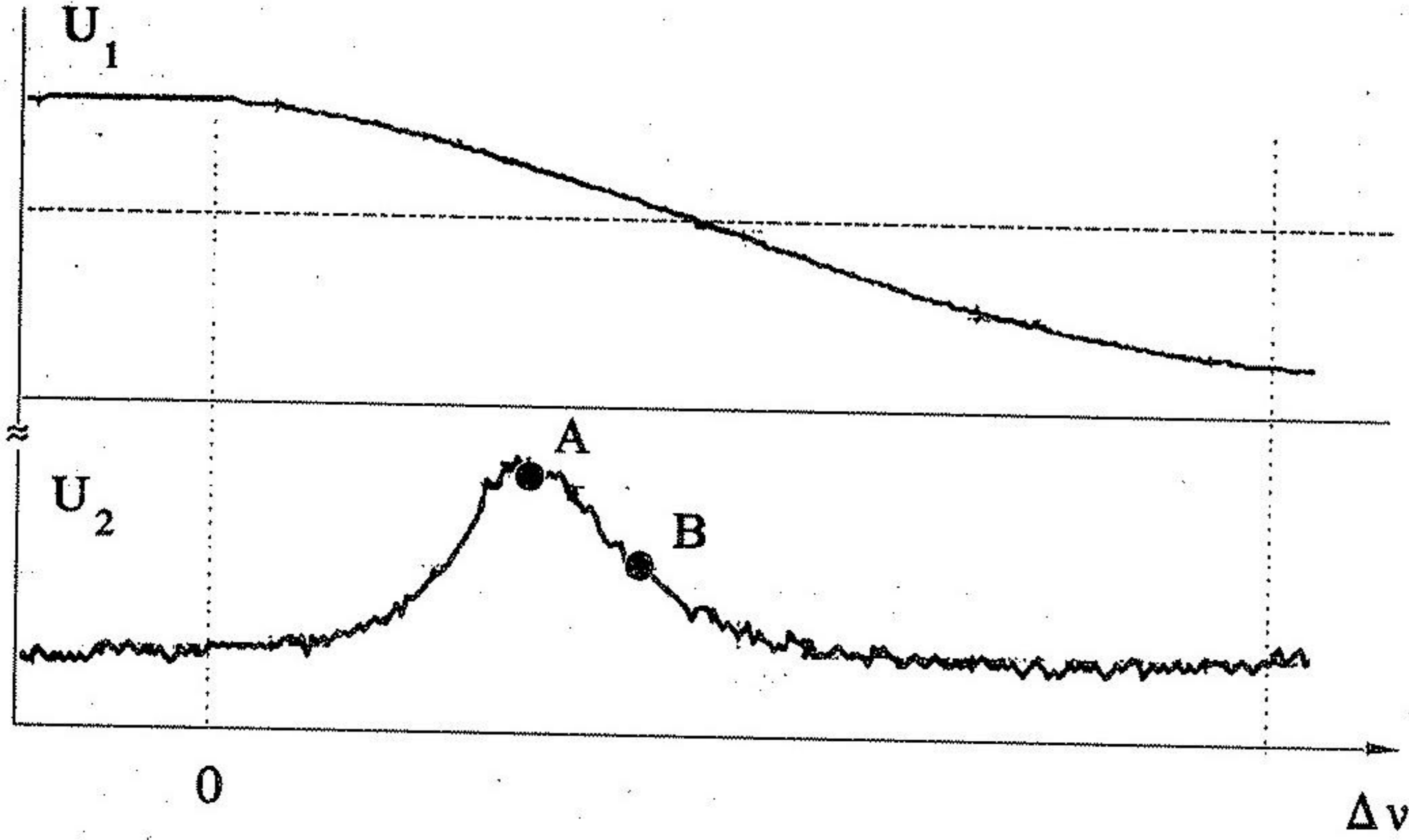
Şekil 5. ECDL boyutunun 3 kHz'te module edilirken ivme ölçerin elektriksel çıkışının (a) ve interferometrenin çıkış sinyalinin (b) zamana göre değişimi.

ölçerin hareketinden dolayı lazerin frekansındaki değişime bağlı olan ivme ölçerin elektriksel çıkışı (a) ve interferometrenin çıkış sinyali gösterilmiştir. Şekil 6 ve 7'de sadece ivme ölçerin yerdeğiştirme değerleri farklıdır. Şekil 7'deki yerdeğiştirme değeri o kadar küçültülmüştür ki, lazerin frekansındaki değişim $\Delta\nu_1$ 'e ulaşmıştır. Böylelikle, interferometrenin çıkışındaki sinyalin frekansa göre değişimi Şekil 6'daki A ve B noktaların arasındaki değişime denk gelmektedir. Bu deneyde lazerin frekansı $\Delta\nu=12$ MHz kadar değişmiştir, bu da ivme ölçerin $\Delta L=5.1$ nm yerdeğiştirmesini ifade etmektedir. PZT kullanarak alınan deney sonuçlarını (Şekil 6 ve 7) titreşim uyarıcısı ile yapılan ölçümlerin sonuçları ile (Şekil 3) karşılaştırıldığında, 5 nm yerdeğiştirme seviyesinde (Şekil 7) hem ivme ölçerin elektriksel çıkışı, hem de interferometrenin çıkış sinyali çok daha yüksek S/N oranı ile kaydedildiği görülmektedir. Bu ise, mutlak yerdeğiştirme ölçümlerinde belirsizliğin 5 nm'den çok daha düşük seviyede olmasını göstermektedir.

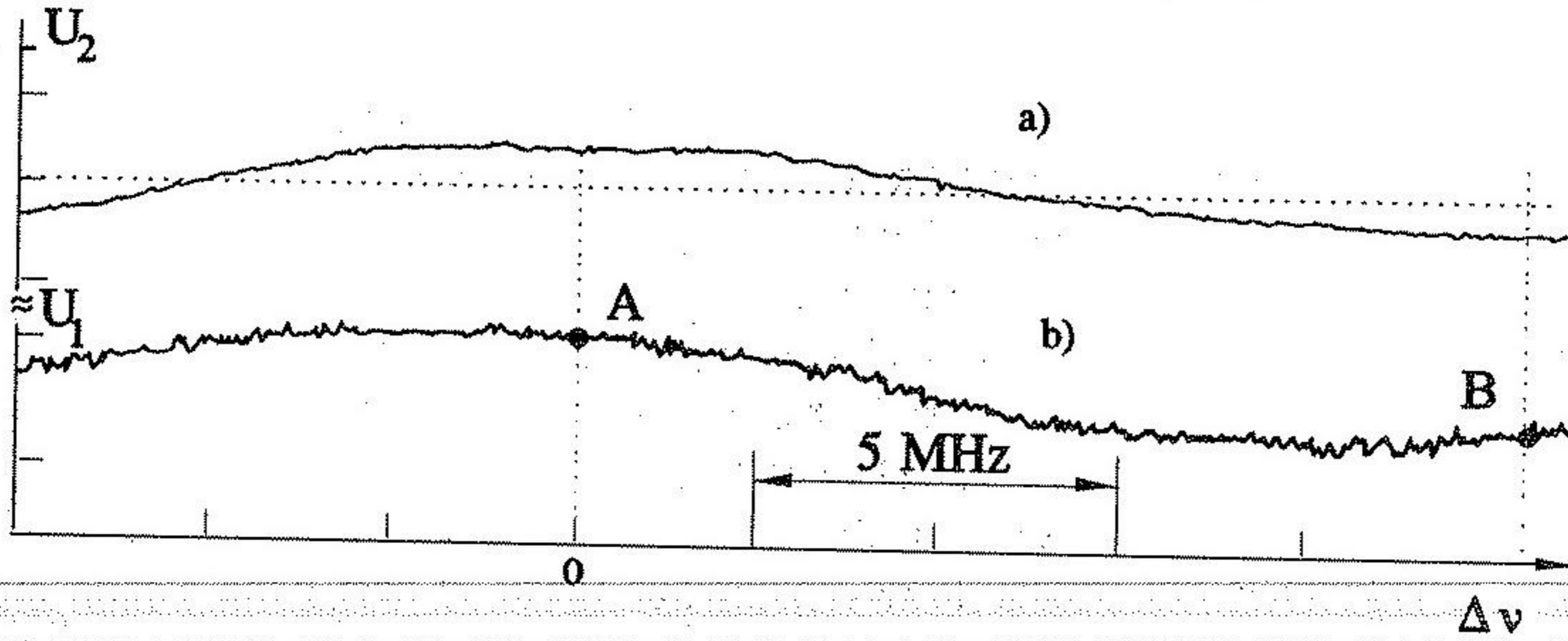
İvme ölçerin yerdeğiştirmesinden dolayı elektriksel çıkışının değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu şekilde, X ekseninde yerdeğiştirmenin genliği gösterilmiştir. Şekil 8'den görüldüğü ivme ölçerin elektriksel çıkışı yerdeğiştirmeye bağlı olarak 5-80 nm aralığında lineer değişir. Bu doğrunun eğiliminden ivme ölçerin hassasiyeti aşağıda verilen ifade ile

$$S_{qa} = \frac{\Delta q}{a} = \frac{\Delta U_1}{\Delta L} \frac{C}{(2\pi f)^2} \quad (6)$$

hesaplandı. Yukarıdaki ifadede, C ivme ölçer, kablo ve yükselteç sisteminin toplam kapasitansı, f ise PZT'ye uygulanan sinyalin frekansı.

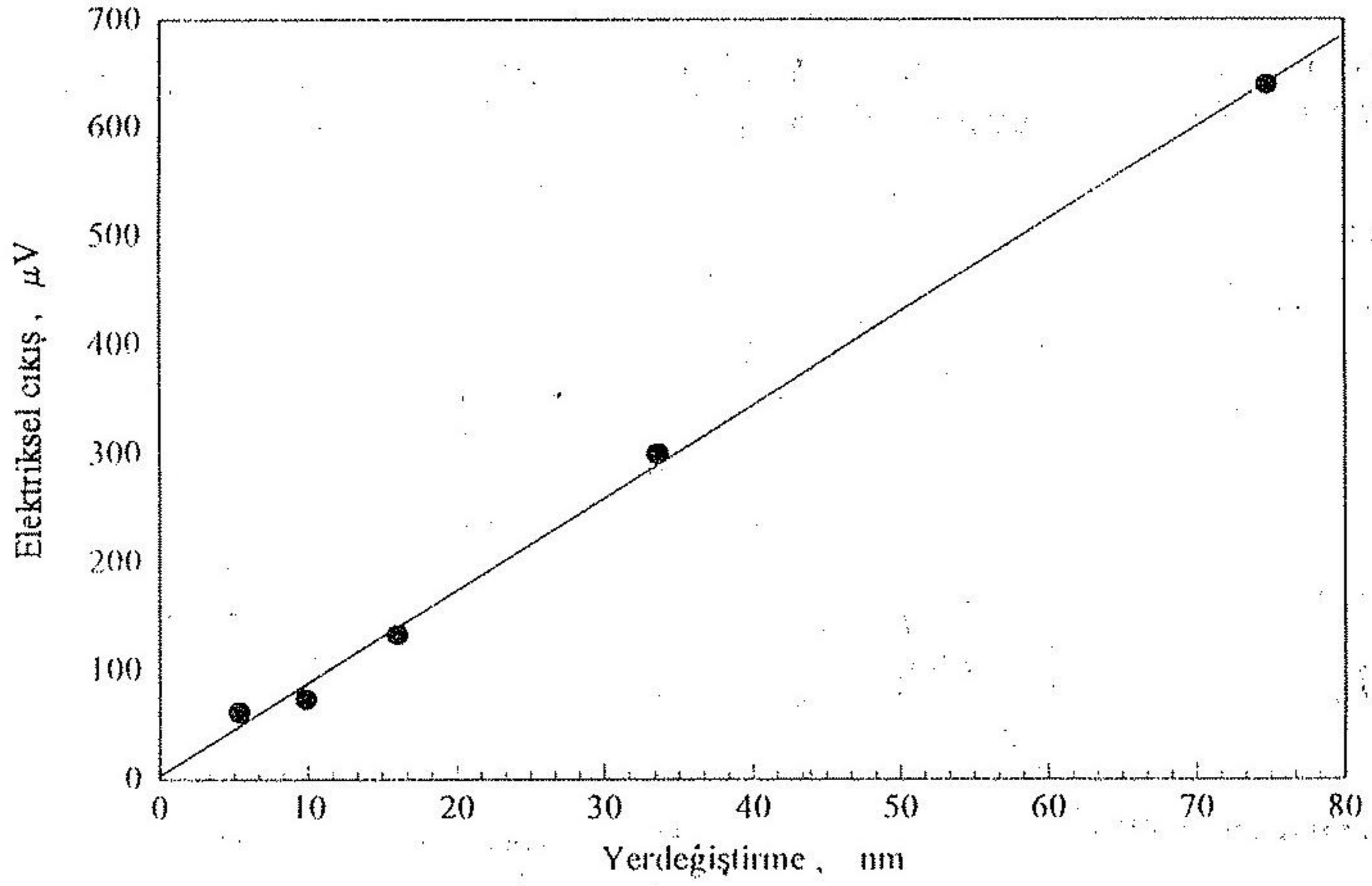


Şekil 6. İvme ölçerin hareketinden dolayı lazerin frekansındaki değişime bağlı ivme ölçerin elektriksel çıkışı (a) ve interferometrenin çıkış sinyali (b).



Şekil 7. İvme ölçerin hareketinden dolayı lazerin frekansındaki değişime bağlı ivme ölçerin elektriksel çıkışı (a) ve interferometrenin çıkış sinyali (b).

Diğer bir değişle, böylece düşük yerdeğiştirme bölgesinde ivme ölçerin kalibrasyonu yapılmıştır. Elde edilen hassasiyet değeri sertifikada verilen ve Michelson interferometresi ile 300 nm'nin üzerindeki yerdeğiştirme bölgesinde alınan sonuçlarla iyi bir şekilde uyum sağlamaktadır.



Şekil 8. İvme ölçerin yerdeğiştirmeye göre elektriksel çıkışının değişimi.

3.Sonuç

Aktif lazer yöntemi ve dış kaviteli diyot lazer (external cavity diode laser, ECDL) kullanarak küçük yerdeğiştirmeler (5-900 nm) ölçülmüştür. Yerdeğiştiren yüzey ECDL'in dış aynası olarak kullanılmış ve lazerin frekansındaki değişim incelenerek, yöntemin küçük yerdeğiştirme ölçümleri için hassas olduğu ispatlanmıştır. ECDL sisteminde yerdeğiştiren yüzeyin titreşim standardının (Brüel & Kjaer Tip 8305 ivme ölçer) kullanılması ve ivme ölçerin kalibrasyonunun yapılması, makalede önerilen yöntemin metrolojinin diğer alanlarında da (boyutsal, titreşim, basınç, kütle ölçümleri) kullanılması umutvericidir. Küçük yerdeğiştirme ölçümlerinin daha hassas yapılması için ilerde ECDL akımının modülasyon tekniği, yüksek kaliteli Fabry-Perot interferometresi ve biri atomik geçişte kilitlemiş iki ECDL'nin frekans farkını inceleyerek, deneylerin yapılması amaçlanmaktadır.

Teşekkür:

Biz, her türlü teknik yardımlarından dolayı Sevilay UĞUR, İsmail TAŞKIN ve Savaş ACAK'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar

1. Documents concerning the new definition of the metre
Metrologia, v.19, pp.163-177, 1984
2. Special issue on selected papers CPEM/94, IEEE transactions on Instrumentation and Measurement, v.44, No.2, 1995
3. R.Gamidov, A.İzmailov, H.Uğur
Optics and Spectroscopy, v.15, No.5, pp.291-299, 1993
4. R.Gamidov, İ.Taşkın and V.Sautenkov
In Proc.Int.Freq.Contr.Symp.IEEE (FCS), 31 May - 2 June 1995,
San-Fransisco, USA
5. S.Shinohara et al. IEEE Transactions on Ins. and Meas., v38, pp.574-577, 1989.
6. M.Toyoshima et al., In Proc. IMTC'94, May 10-12, Hamamatsu, pp.336-339
7. H.Billing et al., J.Phys.E, v.12, pp.1043-1049, 1979
8. V.Braginsky, V.Rudenko, Phys.Reports, v.46, pp.167-220, 1978
9. J.Levine, J.Hall, J.Geophys.Research, v.77, pp.2595-2609, 1972
10. T.Ohishi, Bulletin of NRLM, 1982
11. R.Drever et al., Appl.Phys.B, v.31, pp.97-105, 1983
12. D.Herriot, H.Schulte, Appl.Optics, v.4, pp.883-888, 1965
13. J.Vanier, C.Audoin; The Quantum physics of atomic frequency standards,
Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1986

14. R.Fox et al, Spectrochimica Acta Rev., v.15, No.5, pp.291-299, 1993