

**Atomik Kuvvet Mikroskobu Uygulamaları için
Yüksek Hızlı, Aktüatörsüz, ve Dinamik
Görüntüleme Metodunun Geliştirilmesi**

Proje No: 110T732

Yrd. Doç. Dr. Müjdat BALANTEKİN

AĞUSTOS 2013
İZMİR

Önsöz

Atomik Kuvvet Mikroskopları günümüzde yaygın olarak bir çok araştırmada kullanılan ve atomik boyutta yüzey görüntülemesine olanak veren sistemlerdir. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesinde ve Tübitak Ulusal Genç Araştırmacı Kariyer Geliřtirme Programı kapsamında yürütölen bu projede dinamik ve geri-beslemeli şekilde çalışan Atomik Kuvvet Mikroskoplarının tarama hızlarını arttıracak bir metod geliştirilmiştir. İlk olarak nümerik simölasyonlar yapılmış ve önerilen metodun mevcut sistemlerin hızlarını arttırabileceği teorik olarak gösterilmiştir. Daha sonra Georgia Institute of Technology'de metodun kanıtlama deneyleri yapılmıştır. Dünyada ve Ülkemizde hızla gelişmekte olan Nanoteknoloji alanında yapılan bu çalışmanın ileride bir çok araştırmacıya faydalı olabileceğini düşünüyor, laboratuvar imkanlarından faydalanmamızı sağlayan Prof. F. Levent Değertekin'e, desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a, ve emeği geçen herkese teşekkürlerimizi sunuyoruz.

İçindekiler

Özet.....	5
Abstract.....	6
Giriş.....	7
Metod.....	9
Simülasyonlar.....	12
Deneyler.....	21
Sonuç.....	26
Referanslar.....	27
Ekler.....	28

Şekil Listesi

Şekil 1. Metodun çalışma prensibinin açıklanması.....	10
Şekil 2. GM-AKM sistemleri için önerilen yüksek hızlı görüntüleme metodunun blok diyagramı.....	11
Şekil 3. FM-AKM sistemleri için önerilen yüksek hızlı görüntüleme metodunun blok diyagramı.....	11
Şekil 4. Simülasyonlarda kullanılan genlik dedektörü.....	13
Şekil 5. Simülasyonlarda kullanılan frekans dedektörü.....	13
Şekil 6. Geleneksel sistemde elde edilen topografya sinyali.....	14
Şekil 7. Geleneksel sistemde zamana göre elde edilen prob salınım sinyali ve etkileşim kuvvetleri.....	15
Şekil 8. Yüksek-hızlı FM-AKM sisteminde zamana göre elde edilen prob salınım sinyali ve etkileşim kuvvetleri.....	15
Şekil 9. Yüksek-hızlı GM-AKM sisteminde zamana göre elde edilen prob salınım sinyali ve etkileşim kuvvetleri.....	15
Şekil 10. Yüksek-hızlı GM-AKM sisteminde denek yüzeyi taranırken birinci ve yüksek frekanslı titreşim modlarındaki salınım genliklerinin değişimleri.....	16
Şekil 11. Yüksek-hızlı FM-AKM sisteminde denek yüzeyi taranırken birinci modun salınım genliği ve yüksek frekanslı modun titreşim frekansının değişimleri.....	17
Şekil 12. Yüksek-hızlı GM-AKM sisteminde elde edilen topografya sinyali.....	18
Şekil 13. Yüksek-hızlı FM-AKM sisteminde elde edilen topografya sinyali.....	19
Şekil 14. Yüksek-hızlı GM-AKM sisteminde elde edilen topografya sinyali ($f_1 = 600$ kHz ve $f_n = 12$ MHz).....	20
Şekil 15. Yüksek-hızlı FM-AKM sisteminde elde edilen topografya sinyali ($f_1 = 600$ kHz ve $f_n = 12$ MHz).....	20
Şekil 16. Deney düzeneği.....	21
Şekil 17. Zamana göre fotodiyot sinyali ve probu titreştiren piezoya uygulanan sinyal.....	22
Şekil 18. Değişik ölçeklerde deneylerde kullanılmış ve kullanılmamış probun SEM mikrografları.....	22
Şekil 19. Değişik ölçeklerde deneylerde kullanılmış denegin SEM mikrografları.....	23
Şekil 20. Kalibrasyon deneginin topografya görüntüleri.....	23
Şekil 21. Q-kontrol devresi ayarının tarama hızına etkisi.....	24
Şekil 22. Değişik frekanslarda modüle edilmiş ikinci modun titreşimine, birinci modun genliğinin verdiği tepkiler.....	25

Özet

Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM) nano bilim ve teknoloji alanında yaygın olarak kullanılan vazgeçilmez bir gereç olmuştur. Ticari sistemler yapısal analiz için yeterli çözünürlük sağlamasına rağmen, dinamik-AKM sistemlerinin görüntüleme hızı bazı uygulamalar için yeterli değildir. Bu projede, AKM uygulamaları için yüksek hızlı, aktüatörsüz, ve dinamik bir görüntüleme metodu geliştirdik. Bu metotta geleneksel AKM düzeneklerinde kullanılması gereken piezotüp aktüatörünü kullanmıyoruz. Bunun yerine, Q-kontrollü AKM probunun titreşim modunu aktüatör fonksiyonunu yerine getirmesi için kullanıyoruz. Sıradan bir AKM probuyla bile görüntüleme hızının geleneksel dinamik-AKM görüntüleme yöntemine kıyasla 100 kat mertebesinde arttırılacağını gösterdik. Frekans modülasyonlu AKM sistemlerinde, belirli koşullar altında, rezonans frekansı 600 kHz olan bir prob ile 100×100 piksellik görüntünün 24 çerçeve/sn hızında alınabileceğini teorik olarak gösterdik. Metodu, tarama zamanı, deneğe uygulanan geçici kuvvetlerin tepe değeri, ve ölçüm hatası bakımından değişik denek ve prob parametreleri için inceledik. Görüntüleme hızının yüksek rezonans frekanslı proplar kullanılarak daha fazla arttırılabileceğini gösterdik. Metodun vurmali-modda çalışan AKM üzerinde kanıtlama deneylerini gerçekleştirdik. Deney sonuçları görüntüleme hızının geleneksel görüntüleme yöntemine göre önemli ölçüde arttırılabileceğini göstermiştir. Bu metod elbette herhangi bir özel veya küçük proba ihtiyaç duymadan AKM ile görüntüleme deneylerine harcanan zamanı azaltacaktır. Ayrıca, bu metod dinamik-AKM sistemlerinin endüstriyel ölçekli nano metroloji ve manipülasyon için kullanımlarını yaygınlaştıracaktır. Metodun, küçük prob ve hızlı X-Y tarayıcısı bulunan dinamik-AKM sistemlerine uygulanmasıyla, nanomakinelerin ve bir kaç milisaniye içerisinde gerçekleşen biyomoleküler işlemlerin gerçek-zamanlı görüntülenmesi yakın bir gelecekte mümkün olabilecektir.

Anahtar kelimeler: Atomik Kuvvet Mikroskobu, Yüksek Hızlı Dinamik-AKM Görüntülemesi, Hızlı Aktüasyon, Q-kontrollü Prob Titreşim Modu, Nano Metroloji

Abstract

Atomic Force Microscope (AFM) has become a widely used and indispensable tool in nano science & technology. Although the commercial systems provide required spatial resolution for structural analysis, the imaging speed of dynamic AFM systems is not satisfactory for certain applications. In this project, we developed high-speed, actuatorless, and dynamic imaging method for AFM applications. In this method we do not use a piezotube actuator that has to be employed in conventional AFM setups. Instead, we utilize a Q-controlled eigenmode of an AFM cantilever to perform the function of the actuator. We show that even with an ordinary tapping-mode cantilever, imaging speed can be increased by about 2 orders of magnitude compared to conventional dynamic-AFM imaging. We have shown theoretically under certain conditions that 24 frames/sec imaging speed can be achieved with a cantilever having a resonance frequency of 600 kHz to acquire 100×100 pixels image in the frequency modulation AFM system. We investigated the method in terms of scan time, peak transient forces applied to the sample, and the measurement error for different sample and cantilever parameters. We have shown that the imaging speed can be increased further by using cantilevers with higher resonance frequencies. We performed the proof-of-principle experiments of the the method in a tapping-mode AFM. The experimental results have shown that imaging speed can be improved significantly as compared to conventional imaging. This method will indeed minimize the time spent for AFM imaging experiments without requiring special or small cantilevers. It can also enable the dynamic-AFM systems to be used widely in industrial scale nano metrology and manipulation. By utilizing this method in dynamic-AFM systems with small cantilevers and fast X-Y scanners, real-time imaging and characterization of nanomachines and biomolecular processes which can occur in a few milliseconds can be possible in the near future.

Key words: Atomic Force Microscope, High-speed Dynamic-AFM Imaging, Fast Actuation, Q-controlled Cantilever Eigenmode, Nano Metrology

Giriş

Taramalı prob mikroskopları deneklerin yüzeyini tarayarak, bunların topografyalarını ve bazı özelliklerini, fiziksel, kimyasal, biyolojik, vb., nanometre ölçeğinde elde etmeyi sağlayan cihazlar olup, temel olarak hepsi sivri uçlu bir prob ihtiva eder. Taramalı prob mikroskopları yaptıkları ölçümlere göre değişik adlar alabilir. Örneğin, manyetik özellikleri ölçen taramalı prob mikroskoplarına manyetik kuvvet mikroskopları denir. En yaygın olarak kullanılan taramalı kuvvet mikroskobu Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM) (BINNIG, 1986) olup, iletken ve yalıtkan malzemelerin yüzey topografyalarının ve bazı özelliklerinin havada, suda, ve vakumlu ortamlarda atomik ve moleküler çözünürlükte elde edilmesini sağlar. AKM nano bilim ve teknolojinin son yıllarda ilerlemesinde önemli rol oynamıştır. Malzeme bilimi, Fizik, Kimya, ve Biyoloji alanlarında atomik ve moleküler seviyede araştırma yapan bilim adamları AKM sayesinde daha önceden elde edilemeyen doğruluk ve hassasiyette ölçüm, görüntüleme, ve karakterizasyon yapabilmektedirler.

Statik olarak çalıştırılan atomik kuvvet mikroskoplarında prob titreştirilmez. Dinamik sistemlerde ise prob genellikle bir piezoelektrik eleman ile titreştirilir ve probun ucu denek yüzeyine periyodik olarak temas eder. Prob yüzeye değmez iken titreşim frekansı değiştirilince titreşim genliğinin arttığı rezonanslar görülür, bunlara probun titreşim modları denir. Dinamik sistemlerde prob sadece bu titreşim modlarının genellikle en düşük frekanslı olanında yani birinci titreşim modunda titreştirilir. Böylece prob ucunun denek yüzeyi ile girdiği periyodik etkileşim, etkileşim kuvvetlerini doğurur. Etkileşim kuvvetleri de probun titreşim genliği, fazı, veya frekansında değişikliklere yol açar. Denek yüzeyine uygulanan kuvvetler belirli bir seviyenin altında sabit tutulmak istendiğinden, titreşim genliği, fazı, veya frekansındaki değişikliklere göre bir aktüatör vasıtası ile denek veya prob birbirlerine yaklaştırılır veya uzaklaştırılır. Etkileşim kuvvetlerini sabit tutmak için eğer denek yüzeyinde artan bir topografya varsa, aktüatör, prob ile denegi birbirinden uzaklaştırıcı yönde, azalan bir topografya var ise de aktüatör, prob ile denegi birbirine yaklaştırıcı yönde hareket eder. Dolayısıyla aktüatör hareketi bize yüzey topografyasını verir.

Dinamik sistemler de kendi aralarında vurmali ve temassız yöntemler olmak üzere ikiye ayrılır. Vurmali yöntemde probu titreştiren bir sinyal üreticisi olup, titreşim frekansı sabittir ve titreşim genliğindeki değişimler aktüatörü hareket ettirir, dolayısıyla bu yöntemi kullanan sistemlere genlik-modülasyonlu (GM-AKM) sistemler de denir. Temassız yöntem de ise probu titreştiren bir pozitif geribesleme devresi vardır, titreşim frekansındaki değişimler de aktüatörü hareket ettirir, dolayısıyla bu yöntemi kullanan sistemlere frekans-modülasyonlu (FM-AKM) sistemler de denir (GARCIA, 2002). Geleneksel vurmali mod, çoğunlukla kullanılan tanımla, prob ucunun, denek (sample) ile bir osilasyon periyodunun yarısından daha az bir süre içerisinde itici kuvvetlerin hakim olduğu bir etkileşime girdiği operasyon şeklidir. Deneylerin yapıldığı ortam hava ise GM-AKM basit çalışma şekline ötürü tercih sebebidir. Frekans-modülasyonlu AKM modu, vakumda yapılan ve prob - denek arasında genellikle çekici kuvvetlerin hakim olduğu deneylerde, AKM probunun yüksek Q'ya sahip olması dolayısıyla GM-AKM'de kullanılan genlik dedektörünün yavaş çalışıp görüntüleme süresini arttırması sebebiyle geliştirilmiştir (ALBRECHT, 1991). Bununla birlikte FM-AKM yöntemi hava ortamında da kullanılabilir. Atomik ölçekte kuvvet spektroskopisi ve malzeme karakterizasyonu için çoklu frekansta uyarma FM-AKM sistemlerinde son zamanlarda kullanılmaya başlamıştır (NAITOH, 2010).

Genlik modülasyonlu AKM sisteminde, titreşim frekansı fonksiyon üreticisi tarafından ayarlanır. Genellikle bu frekans probun boşluktaki rezonans frekansının biraz altı seçilir. Prob, denek yüzeyine yaklaştırıldığında genliği azalır, ve bu değişim foto diyot tarafından algılanır. Lazer ışınının prob yüzeyinden yansıtılarak statik veya dinamik yer değiştirmenin foto dedektörle algılanması, kısaca optik kaldıraç metodu, günümüz AKM sistemlerinde en sık kullanılan tekniktir. Foto diyot sinyali kitlemeli yükseltgeç gibi bir genlik ölçere bağlanır. Genlik değerini sabit bir değerde tutmak için PID kontrolör hata değerini azaltacak şekilde denegi piezo tüp gibi bir aktüatör vasıtasıyla aşağı-yukarı hareket ettirir. Ayrıca, foto diyot sinyali bir yükseltgeç ve faz kaydırıcısından geçirilirse, probun hızıyla orantılı bir sinyal elde edilir. Bu sinyal de fonksiyon üreticisinde gelen sinyalle toplanıp piezo'ya uygulanırsa, probun suni Q-faktörü azaltılabilir, örneğin, genliğin yatışkan-duruma daha hızlı geçmesini sağlamak amacıyla, veya arttırılabilir, örneğin, sudaki düşük Q'lu durumlarda. Frekans modülasyonlu AKM sisteminde ise prob, bir genlik regülatörü ve faz kaydırıcısı kullanılarak, pozitif geri besleme yöntemiyle rezonans frekansında

titreştirilir. Dedektör sinyalinin genliği sabit tutuluyorsa, buna sabit titreşim genliği, uyarıcı sinyal sabit tutuluyorsa da sabit uyarma modu denir. Denek yüzeyi ile prob arasındaki etkileşim kuvveti, osilasyon frekansının değişimine neden olur. Bu anlık değişim FM kip çözücü tarafından algılanır. Bir ayrılık ayarlayıcısı vasıtasıyla da deneği hareket ettirecek piezo sinyali elde edilir.

AKM'nin dinamik modları ölçüm hassasiyeti ve düşük yanal kuvvetler açılarından statik değme moduna göre daha avantajlı olmalarından dolayı tercih sebebidirler. Bununla birlikte dinamik AKM sistemlerinin görüntüleme hızları bazı uygulamalar için yetersizdir. Görüntüleme hızı doğal nanomakinelerin ve biyomoleküler etkileşimlerin gözlemlenmesi gibi uygulamalar için nanobiyoteknolojide gittikçe önem kazanmaktadır (KODERA, 2010; IGARASHI, 2011). Görüntüleme hızını arttırmak için yakın geçmişte yapılan çeşitli araştırmalara rağmen bir kaç milisaniye gibi çok kısa zamanda gerçekleşen biyomoleküler işlemlerin görüntülenmesi halen çözülememiş önemli bir teknolojik problemidir. Ayrıca dinamik AKM ile nano ölçekli görüntüleme deneylerinin hızlarının artırılması kendi başına önemli olmakla birlikte, bu gelişme dinamik AKM sistemlerinin endüstriyel seviyede nano metroloji ve manipülasyon alanında kullanımını etkinleştirecektir.

Dinamik AKM sistemlerinin tarama hızını sınırlayan başlıca etmenler, denek veya probun dikey pozisyonunu ayarlayan mekanik aktüatörün bant genişliği ile, probun zamandaki geçici tepkisidir. Bunlara ilaveten, X-Y tarayıcısının, elektronik dedektörün, ve kontrolörün de tarama hızına etkileri vardır (SCHITTER, 2004; FANTNER, 2006). Son zamanlarda yapılan başlıca çalışmalarda, görüntüleme hızını arttırmak için sensör ve aktüatörün boyutları küçültülerek sistemin bant genişliği artırılmaya çalışılmış, bu da kullanılan AKM sistemlerinin daha kompleks bir yapıda olmasını zorunlu kılmıştır (FANTNER, 2006; ANDO, 2008). Yine yüksek hızlı görüntüleme için hızlı X-Y tarayıcıları geliştirilmiş (HUMPHRIS, 2005; ZHAO, 2009; BRAUNSMANN, 2010), entegre aktüatörlü özel problemler dizayn edilmiştir (MANALIS, 1996; SULCHEK, 2000, AKIYAMA, 2002, DEGERTEKIN, 2005). Ayrıca genlik modülasyonlu sistemlerde, probun Q'sundan kaynaklanan gecikmeleri önlemek amacıyla Q-kontrol metodu geliştirilmiştir. Fakat suni Q değerinin düşürülmesi, yüzeye uygulanan kuvvetleri önemli ölçüde arttırdığından, uyarlamalı Q-kontrol ve dinamik PID kontrol metodları önerilmiştir. Bu metodlar Q-kontrol metoduna göre yüzeye daha az kuvvet uygulamakla birlikte daha yavaşlardır. Literatürde dinamik-AKM sistemiyle teorik olarak kayda geçen en yüksek tarama hızı 25 çerçeve/saniye olup, bu hıza 1.2 MHz rezonans frekanslı bir prob ve 370 kHz bant genişliğine sahip bir piezo aktüatör ile ulaşılabilmektedir (ANDO, 2012).

Yakın bir gelecekte CMOS üretim teknolojisinin limitine ulaşılabileceğinden, SWNT tabanlı FET gibi yeni nanoelektronik yapıların araştırmalarına hız verilmiştir. Nano ölçekli parçacıkların daha hafif ve güçlü malzemeler, polimer moleküllerinin daha iyi yüzey kaplamaları, veya kanser hücrelerinin daha etkin ilaçlar elde etmek için incelenmesi gibi araştırmalar da yaygın hale gelmiştir. Moleküllerin bir araya gelerek işlevsel yapılara dönüşümünü ve hücreler arası haberleşmeyi düzenleyen biyomoleküler etkileşimlerin gerçek-zamanlı gözlemlenmesi, yeni nanomakinelerin nasıl tasarlanacağı hakkında bilgi sahibi olmak için biyolojik hücrelerin belirli görevler için üretmiş olduğu doğal moleküler makinelerin çalışırken incelenmesi gibi uygulamalar halen çözülmemiş teknolojik problemlerdir. Dolayısıyla, yüksek hızlı dinamik AKM sistemlerinin genel olarak Nanoteknoloji olmak üzere, Moleküler Biyoloji, Nanoelektronik, ve Malzeme Bilimleri gibi alanlarda birçok araştırmaya ivme kazandıracığı kesindir.

Bu projede, hem GM-AKM ve hem de FM-AKM sistemlerinde kullanılabilecek yüksek hızlı, aktüatörsüz, ve dinamik bir görüntüleme metodu geliştirilmiştir. Önerilen metodun en önemli özelliği prob-denek mesafesini ayarlamak için piezotüp gibi ayrı bir aktüatöre ihtiyaç duymamasıdır. Bu da sistemin bant genişliğini dolayısıyla tarama hızını arttırmaktadır. Geliştirilen bu metodun geleneksel AKM sistemlerine entegrasyonu ile öncelikle gerçek-zamanlı görüntüleme gerektirmeyen uygulamalarda, yapılan ölçümlerdeki termal ve mekanik sürüklenmelerden kaynaklanan hatalar azaltılacak ve aynı zamanda deneylerdeki zaman kaybı en aza indirgenecektir. Gerçek-zamanlı yüzey, malzeme, ve sistemlerin görüntülenmesi kompleks AKM sistemlerine ihtiyaç duyulmadan gerçekleştirilebilecektir. Metodun yüksek frekanslı prob ve hızlı X-Y tarayıcısı kullanan sistemlere uygulanmasıyla biyonomakinelerin ve biyomoleküler etkileşimlerin bir kaç milisaniye/çerçeve tarama hızlarında görüntülenmesi mümkün olabilecektir. Önerilen metod geri beslemeli ve dinamik olduğu için denek yüzeyine uygulanan kuvvetler düşük olacak ve dolayısıyla deneğe tarama sırasında hasar verilmeyecektir.

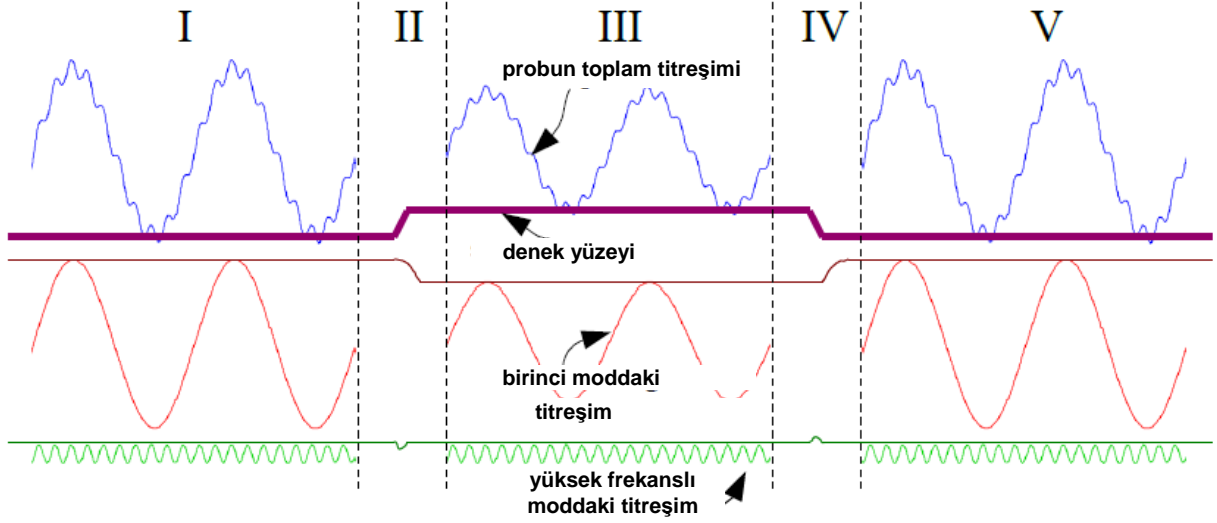
Bu raporda, öncelikle önerilen metod ve çalışma prensibi detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Sistem modellenerek nümerik simülasyonları yapılmış ve geleneksel sisteme göre avantaj ve dezavantajları gösterilmiştir. Teorik olarak belirli koşullarda ulaşılabilecek tarama hızları saptanmış ve literatürde kullanılan sistemlere kıyaslaması yapılmıştır. Metodun hayata geçirilmesi için tasarlanan elektronik sistem ve deney düzeneğinden bahsedilmiştir. Önerilen metod ve geleneksel yöntemle elde edilen deney sonuçları verilmiştir. Projeden elde edilen sonuç ve kazanımlar sunulmuştur.

Metod

Metodun çalışma prensibi probun yüksek frekanslı titreşim modundaki titreşim genliği, fazı veya frekansını sabit bir değerde tutmak için Q-kontrollü düşük frekanslı titreşim modundaki titreşim genliğinin değiştirilmesi esasına dayanır. Başka bir ifadeyle prob ucu ve denek yüzeyi arasındaki mesafe geleneksel AKM sistemlerinde kullanılan ve tarama hızını sınırlayan piezotüp aktüatör yerine Q-kontrollü probun düşük frekanslı titreşim modundaki titreşim genliğinin değiştirilmesi ile ayarlanmaktadır. Burada bahsedilen düşük frekanslı titreşim modu, örneğin, probun birinci titreşim modu olabilir, yüksek frekanslı titreşim modu da, örneğin, probun ikinci, üçüncü, veya daha üzeri titreşim modları olabilir.

Hızlı algılama ve aktüasyon için prob ve aktüatör boyutlarının küçültülmesi gerektiği bilinmektedir. AKM sistemlerindeki en küçük mekanik eleman da probdur. Dolayısıyla, bu en küçük parçayı hem kuvvet algılamasında hem de bant genişliğini sınırlayan en önemli etmen olan Z-piezosu yerine aktüasyonda kullanarak sistemin bant genişliğini ve tarama hızını arttırabiliriz. Geleneksel sistemlerde kullanılan Z-piezosunun rezonans frekansı bir kaç kHz civarındadır. Bununla birlikte, tipik bir vurmali-mod probunun rezonans frekansı bir kaç yüz kHz civarındadır. Yani AKM probunun zamandaki geçici tepkisi daha hızlı olacaktır. Fakat, tipik bir vurmali-mod probu aynı zamanda hava ve vakum ortamlarında yüksek Q-faktörüne de sahiptir. Bu da probun düşük frekanslı titreşim modundaki titreşiminin yatışkın-duruma geçme süresini uzatacaktır. Bu problemi düşük frekanslı titreşim moduna Q-kontrol metodunu (ANTOGNOZZI, 2003) uygulayarak çözebiliriz. Bu şekilde probun düşük frekanslı titreşim modundaki titreşim genliği yatışkın-duruma hızlı bir şekilde geçecektir.

Metodun çalışma prensibi prob ucunun denek yüzeyini taradığı zaman ortaya çıkacak elektronik sinyallerle Şekil 1'de açıklanmıştır. Kesikli dikey çizgilerle denek yüzeyi beş bölüme ayrılmış ve sinyaller bu bölümlerde açıklanmıştır. I. bölümde, probun toplam titreşim sinyali, probun denek yüzeyi ile periyodik olarak etkileşime girdiğini göstermektedir. Probu toplam titreşim sinyali, probun düşük frekanslı titreşim modundaki titreşim sinyali ile probun yüksek frekanslı titreşim modundaki titreşim sinyalini ihtiva eder. Probu düşük frekanslı titreşim modundaki titreşim genliği, yüksek frekanslı titreşim moduna göre daha yüksektir. Bu bölümde probun düşük frekanslı titreşim modundaki titreşim genliği ile probun yüksek frekanslı titreşim modundaki titreşim genliği, fazı, veya frekansı sabittir. Tarama yönünün soldan sağa olduğunu kabul edersek, II. bölümde denek yüzeyinin topografyasındaki artış nedeniyle probun yüksek frekanslı titreşim modundaki titreşim genliği, fazı, veya frekansı değişir (bu değişim yüksek frekanslı titreşimin üzerine çizilen çizgide küçük bir dalgalanma olarak gösterilmiştir), ve bu değişim de probun düşük frekanslı titreşim modundaki titreşim genliğini azaltır ve prob ucunun topografyadaki artışı takip etmesini sağlar. III. bölümde probun yüksek frekanslı titreşim modundaki titreşim sinyalinin genliği, fazı, veya frekansının sabit kalması için probun düşük frekanslı titreşim modundaki titreşim sinyalinin genliği I. bölüme göre daha azdır. Genlikteki bu azalış (düşük frekanslı titreşim sinyali üzerine çizilen çizgiyle gösterilmiştir) ideal olarak denek yüzeyinin tam tersi olmak zorundadır. IV. bölümde denek yüzeyinin topografyasındaki azalış nedeniyle probun yüksek frekanslı titreşim modundaki titreşim genliği, fazı, veya frekansı, II. bölümdeki değişimin aksi yönde değişir, ve bu değişim de probun düşük frekanslı titreşim modundaki titreşim genliğini artırır ve prob ucunun topografyadaki azalışı takip etmesini sağlar. V. bölümde probun düşük frekanslı titreşim modundaki titreşim genliğinin ayarlanmasıyla prob yine denek yüzeyi ile kararlı etkileşime devam eder. Sonuç olarak, probun düşük frekanslı titreşim modundaki titreşimi aktüatörün görevini yapar ve bu sinyalin genliğinin tersi de bize denek yüzeyinin topografyasını verir.



Şekil 1. Metodun çalışma prensibinin açıklanması. Probu toplam titreşimi, düşük frekanslı titreşimi, ve yüksek frekanslı titreşimi denek yüzeyinin değişik kısımlarında gösterilmiştir.

Birinci ve yüksek frekanslı titreşim modları için nokta-kütle modeli denklemleri (1) ve (2) olarak aşağıda verilmiştir. $y_1(t)$ ve $y_n(t)$ toplam prob salınımları, F_1 ve F_n sürücü kuvvetler, w_1 ve w_n serbest rezonans frekansları, ve Q_1 ve Q_n birinci ve yüksek frekanslı titreşim modları için kalite faktörleridir. Matematiksel olarak, probun birinci modundaki titreşiminin, $y_1(t)$, zamana göre türevi alınarak sabit bir kazançla, G_Q , çarpıldıktan sonra 1. denklemdaki hızla orantılı olan terime eklenir. Uygun seçilen bir G_Q değeri ile birinci titreşim modunun suni Q-faktörü azaltılabilir. Denek yüzeyini tarama sırasında prob-denek kuvvetlerinde $f_{TS}(t)$ değişim olursa, bu değişim $y_n(t)$ tarafından algılanır, ve geribeslemeli kontrolör birinci modu uyarıcı sürücü kuvveti $G_{cont}[y_n(t)]$ ile $F_1 \cos(w_1 t)$ çarpılarak ayarlar. Bu da sonuç olarak $y_1(t)$ 'nin genliğini değiştirir.

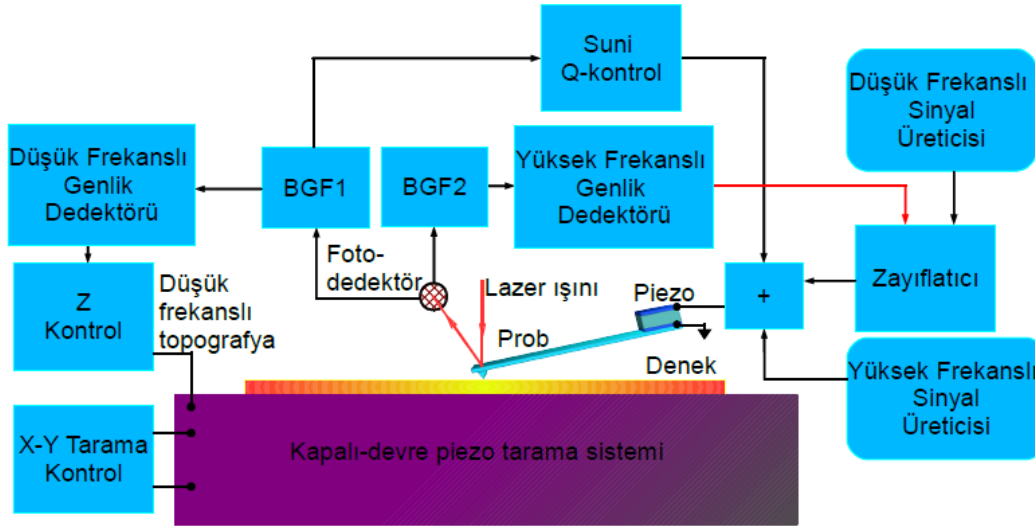
$$\frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} + \frac{w_1}{Q_1} \frac{dy_1(t)}{dt} + G_Q \frac{dy_1(t)}{dt} + w_1^2 y_1(t) = f_{TS}(t) + G_{cont}[y_n(t)] \cdot F_1 \cos(w_1 t). \quad (1)$$

$$\frac{d^2 y_n(t)}{dt^2} + \frac{w_n}{Q_n} \frac{dy_n(t)}{dt} + w_n^2 y_n(t) = f_{TS}(t) + F_n \cos(w_n t). \quad (2)$$

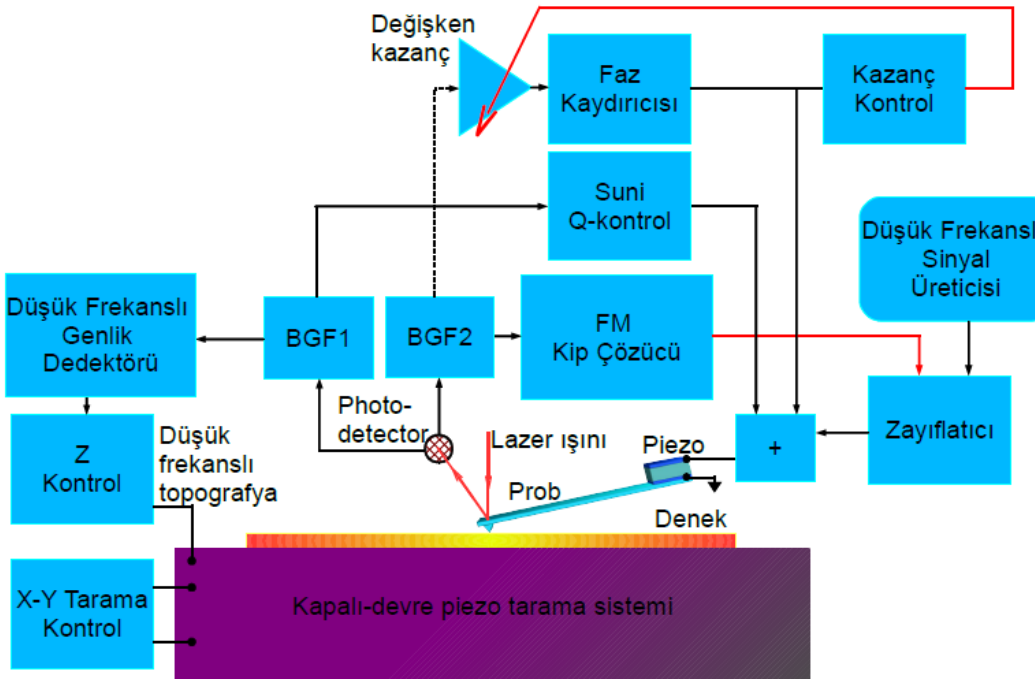
Önerilen yüksek hızlı görüntüleme metodunun genlik modülasyonlu sistemlere uygulanması Şekil 2'de frekans modülasyonlu sistemlere uygulanması ise Şekil 3'te sunulmuştur. Optik kaldıraç mekanizmasıyla laser ışını AKM probunun üzerinden yansıtılarak probun hareketi fotodedektör tarafından algılanır. Fotodedektör sinyali iki bant geçirici filtreden (BGF1) ve (BGF2) geçer. BGF1'in merkez frekansı BGF2'den küçüktür. Böylece probun toplam titreşim sinyalinden, probun düşük frekanslı titreşim modundaki titreşim sinyali ve probun yüksek frekanslı titreşim modundaki titreşim sinyali elde edilir. BGF1 çıkışı bir düşük frekanslı genlik dedektörüne bağlanır. Genlik dedektörü probun düşük frekanslı titreşim modundaki titreşim genliğini ölçer ve bir görüntüleyici vasıtasıyla denek yüzeyi topografyasını elde etmemizi sağlar. Düşük frekanslı genlik dedektörünün çıkışı geleneksel sistemlerde bulunan Z kontrolörüne bağlanabilir. Böylece AKM sisteminin dahili Z kontrolörü düşük frekanslı topografya değişimleri veya yüzeydeki eğimleri dengelemek amacıyla kullanılabilir. Taramayı kontrol eden X-Y kontrolörü ve Z kontrolörü çıkışları kapalı-devre piezo tarama sistemine uygulanır.

Her iki sistemde de düşük frekanslı sinyal üreticisi sabit genlik ve frekansta sinüsoidal aktüasyon sinyalini, $F_1 \cos(w_1 t)$, üretir. GM-AKM sisteminde BGF2 çıkışı probun yüksek frekanslı moddaki titreşim, $y_n(t)$, genliğini ölçmek için yüksek frekanslı genlik dedektörüne bağlanır, ve bu dedektör de düşük frekanslı sinyal üreticisinin bağlı olduğu zayıflatıcıyı kontrol eder (Şekil 2). FM-AKM sisteminde ise Şekil 3'te

görüldüğü gibi BGF2 çıkışı probun yüksek frekanslı moddaki titreşim frekansını ölçmek için FM kip çözücüsüne bağlanır, ve kip çözücü çıkışı da düşük frekanslı sinyal üreticisinin bağlı olduğu zayıflatıcıyı kontrol eder. Bu durumda, BGF2 çıkışı pozitif geri beslemeyi sağlayan bir faz kaydırıcısı, kazanç kontrolörü, ve bir değişken kazanç bloğuna bağlanmıştır (ALBRECHT, 1991). Dolayısıyla yüksek frekanslı sinyal üreticisine ihtiyaç yoktur. Belirtilmesi gereken bir diğer nokta da, denek yüzeyine uygulanan kuvvetleri azaltmak için, kazanç kontrolün girişinin uyarıcı sinyal seçilmesi yani FM-AKM sisteminde sabit titreşim genliği yerine sabit uyarma modunun tercih edilmesidir (UEYAMA, 1998).



Şekil 2. GM-AKM sistemleri için önerilen yüksek hızlı görüntüleme metodunun blok diyagramı.



Şekil 3. FM-AKM sistemleri için önerilen yüksek hızlı görüntüleme metodunun blok diyagramı.

Probun yüksek frekanslı titreşim modundaki titreşim genliği bir genlik dedektörü vasıtasıyla, titreşim fazı veya frekansı da bir frekans dedektörü vasıtasıyla elde edilir. Yüksek frekanslı genlik dedektörü ve FM kip çözücü çıkışları bir PI kontrolöre bağlıdır. PI kontrolör çıkışı da düşük frekanslı sinyal üreticisinin bağlı olduğu zayıflatıcıyı kontrol etmek için $G_{cont}[y_n(t)]$ değerini üretir. Aktüasyon aralığı G_{cont} değerinin alt ve üst limitlerinin seçimiyle ayarlanabilir, örneğin, birinci modun, $y_1(t)$, serbest salınım genliği 500 nm ise ve ayrıca $0.1 \leq G_{cont} \leq 1$ ise, aktüasyon aralığı 50 nm'den 500 nm'ye kadar olacaktır. Bu taranan alandaki yüzey topografyasının yüksekliğinin en fazla 450 nm olması gerektiği anlamına gelir.

Hem GM-AKM hem de FM-AKM sistemlerinde BGF1 çıkışı daha suni Q-kontrol devresinden geçirilip zayıflatılmış düşük frekanslı aktüasyon sinyali ve yüksek frekanslı uyarıcı sinyali ile toplanarak probu titreştiren piezoya uygulanır. Q-kontrol devresi filtrelenmiş foto-dedektör sinyalinin fazının kaydırılması ve bir kazanç ile çarpılması işlevini görür. Görüldüğü üzere bazı parçalar iki sistemde de ortak olamakla birlikte, temel fark yüksek frekanslı modun uyarılma ve algılanma yöntemleridir. FM-AKM sistemlerinde yüksek frekanslı modun titreşimi pozitif geribesleme devresi ile elde edilir, GM-AKM sistemlerinde ise sabit frekanslı voltaj kaynağı kullanılır. Yüksek frekanslı moddaki titreşim frekansı, etkileşim kuvvetlerindeki, $f_{TS}(t)$, değişime anlık tepki vereceğinden, metodun FM-AKM sisteminde daha hızlı çalışması beklenmektedir. Diğer taraftan GM-AKM sistemlerinde hızı daha fazla arttırmak için Q-kontrol yüksek frekanslı moda da uygulanabilir, fakat bu etkileşim kuvvetlerini önemli ölçüde arttırabilir.

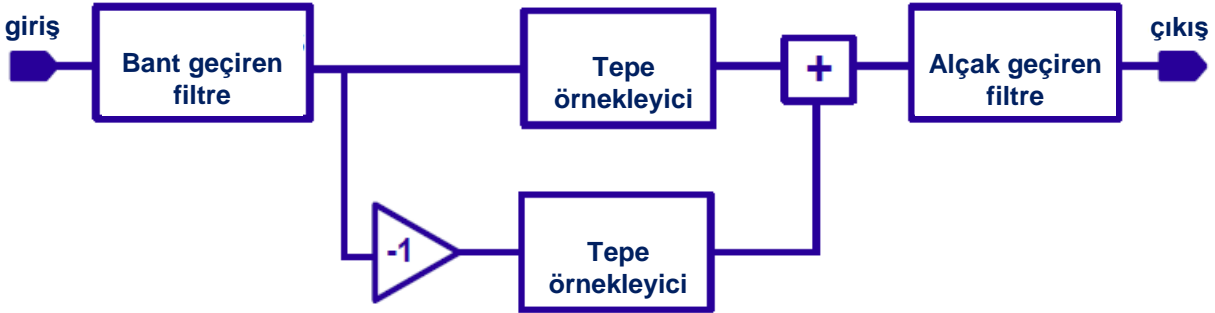
Simülasyonlar

Önerilen yüksek hızlı görüntüleme metodunun avantajları teorik veya deneysel olarak gösterilebilir. Fakat, geleneksel bir AKM sistemi tarama hızında elde edilebilecek maksimum avantajı bize sunmayabilir, çünkü, yüksek hızlı görüntüleme için aynı zamanda yüksek hızlı X-Y tarayıcısına ihtiyaç vardır. Buna ilaveten, etkileşim kuvvetleri geleneksel AKM sistemlerinde elde edilememektedir. Ayrıca geleneksel dinamik AKM sistemlerine direkt ve adil bir kıyaslama yapabilmek için aynı görüntüleme koşulları gereklidir. Bu da deneysel olarak çok zordur. Analitik yaklaşım da kıyaslama için uygun değildir. Amaçlanan herhangi bir yüzey topografyasını en hızlı tarama hızını bulmak olduğundan, $y_n(t)$ 'nin genliğine yakın veya daha yüksek topografyalarda $f_{TS}(t)$ linearize edilemeyebilir veya yatışkan duruma bile geçmeyebilir. Bu yüzden aynı prob-denek sisteminde önerilen metodun geleneksel yöntemle doğru bir şekilde kıyaslanması için bir simülasyon platformu gereklidir.

Daha önceden prob-denek sisteminin nümerik simülasyonlarının elektrik devre simülatörü olan SPICE ile yapılabileceği ve elde edilen sonuçların deneysel verilerle uyuşması neticesinde de simülasyonların güvenilirliği gösterilmiştir (BALANTEKIN, 2003). Buradaki en büyük avantaj ise sistem elektroniğinin kolaylıkla simülasyonlara entegre edilebilmesidir. Birinci ve yüksek frekanslı titreşim modları için (1) and (2)'de verilen nokta-kütle model denklemleri eşlenik elektriksel devrelere dönüştürülebilir. Simülasyonlarda, prob-denek etkileşim kuvvetlerini modellemek için sferik prob ucu için Derjaguin-Muller-Toporov temas modeli kullanılmıştır (BHUSHAN, 1999). Çekici yüzey kuvvetlerini de hesaba katmak için van der Waals kuvvetleri kullanılmıştır. Etkileşim kuvvetleri simülatörde voltaj kontrollü voltaj kaynakları olarak kullanılmakta ve probu uyarıcı sürücü kuvvete seri olarak bağlanmaktadır. Simülasyonlarda baktığımız iki parametreden birincisi tanımlanan yüzey topografyasını belirli bir hata oranıyla elde etmek için gerekli olan minimum süre ve yüzeye uygulanan etkileşim kuvvetlerinin tepe değerleridir.

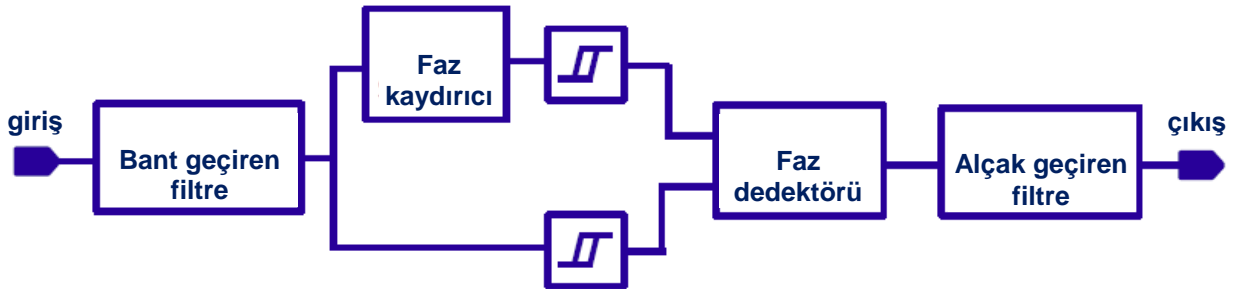
Simülasyonlarda işletim ortamının hava olduğu kabul edilmiştir. Birinci titreşim modunun rezonans frekansı $f_1 = 300$ kHz, yay sabiti $k_1 = 10$ N/m, ve Q-faktörü $Q_1 = 100$ olarak seçilmiştir. Bunlar deneylerde kullanılan tipik bir vurmali-mod probunun parametrelerine yaklaşık değerlerdir. Yüksek frekanslı titreşim modunun rezonans frekansı $f_n = 3$ MHz, yay sabiti $k_n = 100$ N/m, ve Q-faktörü $Q_n = 100$ olarak seçilmiştir. Dikdörtgen şeklinde olan AKM problemlerinin yüksek mertebeli rezonans frekansları birinci rezonansın belirli katlarında olur, örneğin, 2. mod 1. modun yaklaşık 6.3 katında, 3. mod ise yaklaşık 17.5 katında. Yapılan simülasyonları belirli bir prob şekline veya moda kısıtlamamak için bu değerler seçilmemiştir. Prob-denek parametreleri ise yine tipik bir AKM deneyinde karşılaşılabilecek değerler olup, sferik prob ucu yarıçapı $R = 10$ nm, efektif prob-denek elastikiyeti $E_r = 1$ GPa, ve Hamaker sabiti $A_H = 1 \times 10^{-19}$ J olarak alınmıştır.

Simülasyonlarda kullanılan genlik dedektörü Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu dedektör prob titreşiminin hem pozitif hem de negatif tepe değerlerini almak için anahtar ve kapasitörlerle kurulan 2 tepe örnekleme devresinden oluşur (BALANTEKİN, 2011). Prob osilasyonu hem birinci hem de yüksek frekanslı titreşimi içerdiğinden, istenilen sinyali seçmek için ilk önce foto-dedektör sinyali filtrelenir. Simülasyonlarda birinci moddaki titreşimi elde etmek için için kesme frekansı 300 kHz olan 2. dereceden alçak geçiren süzgeç, yüksek moddaki titreşim için de kesme frekansı 3 MHz olan 2. dereceden yüksek geçiren süzgeç kullanılmıştır. Pozitif ve negatif tepe değerlerinin toplanmasıyla tepeden-tepeye genlik değerleri elde edilmiştir. Son olarak, genlik dedektörü çıkışını temizlemek için kesme frekansı 300 kHz olan 1. dereceden alçak geçiren süzgeç kullanılmıştır.



Şekil 4. Simülasyonlarda kullanılan genlik dedektörü.

Yüksek titreşim modundaki osilasyon frekansını ölçmek için ise Albrecht ve ark. tarafından kullanılan analog FM kip çözücü kullanılmıştır (Bkz. Şekil 5). Yüksek moddaki titreşimi birinci moddaki titreşimden ayırmak için kesme frekansı 3 MHz olan 2. dereceden yüksek geçiren filtre kullanılmıştır. Filtrelenen sinyal iki kola ayrılmıştır. Birinci koldaki sinyalin fazı kaydırılmış ve Schmitt tetikleyicisinden geçirilmiştir, ikinci kolda ise yalnızca Schmitt tetikleyicisi vardır. Bu iki koldaki çıkış sinyalleri faz dedektörüne uygulanır. Bu çalışmada kullanılan faz dedektörü basit bir XOR mantık geçididir. Yüksek titreşim modundaki osilasyon frekansına karşılık gelen voltaj değerini elde etmek için son olarak kesme frekansı 300 kHz olan 1. dereceden alçak geçiren süzgeç kullanılmıştır.

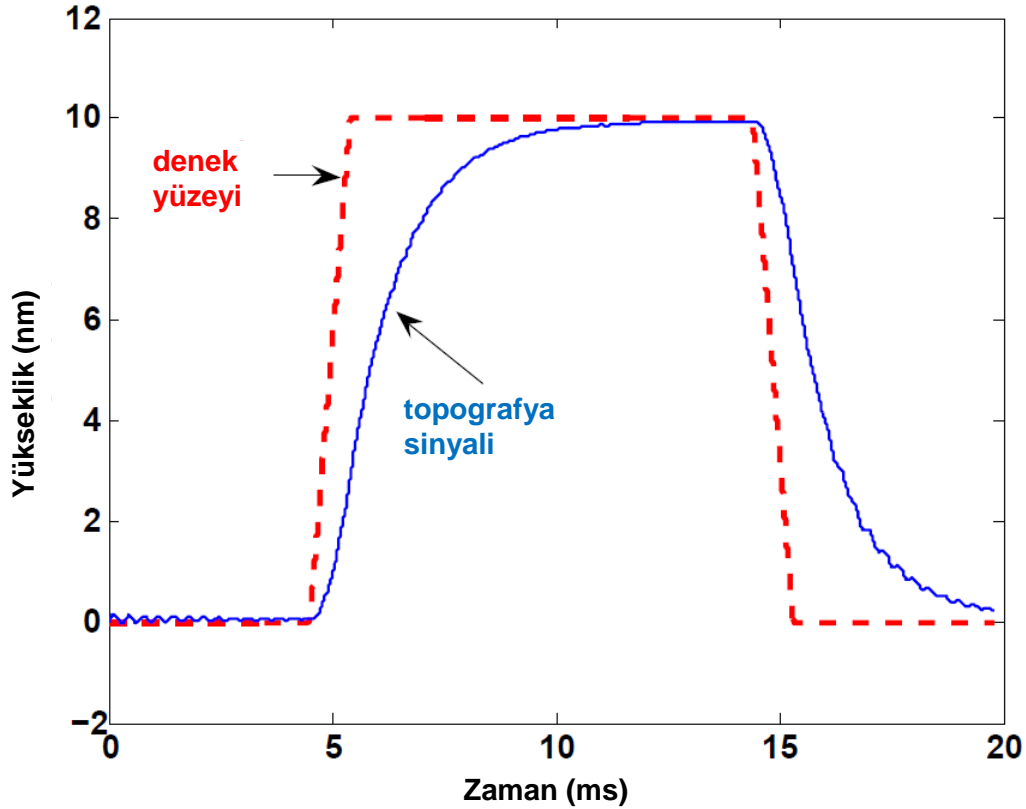


Şekil 5. Simülasyonlarda kullanılan frekans dedektörü.

İlk önce geleneksel vurmali-mod deneyinin simülasyonu yapılmıştır. Tipik bir AKM sisteminde Z-piezosunun rezonans frekansı bir kaç kHz olup, bu simülasyonda Z-piezosu rezonans frekansı 3 KHz ve Q-faktörü 10 olan 2. dereceden bir sistem olarak modellenmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi 10 nm'lik yüksekliğe sahip bir denek yüzeyi tanımlanmıştır. Kabul edilebilecek bir hata oranıyla, tanımlanan yüzeyi mümkün olan en az sürede elde edebilmek için PI kontrolörü kazanç değerleri Ziegler-Nichols methodu ile ayarlanmıştır. Ölçüm hatası (3) nolu denklemde tanımlanmıştır.

$$hata = \frac{\int |denek yüzeyi - topografya sinyali|}{\int |denek yüzeyi|} \times 100\% \quad (3)$$

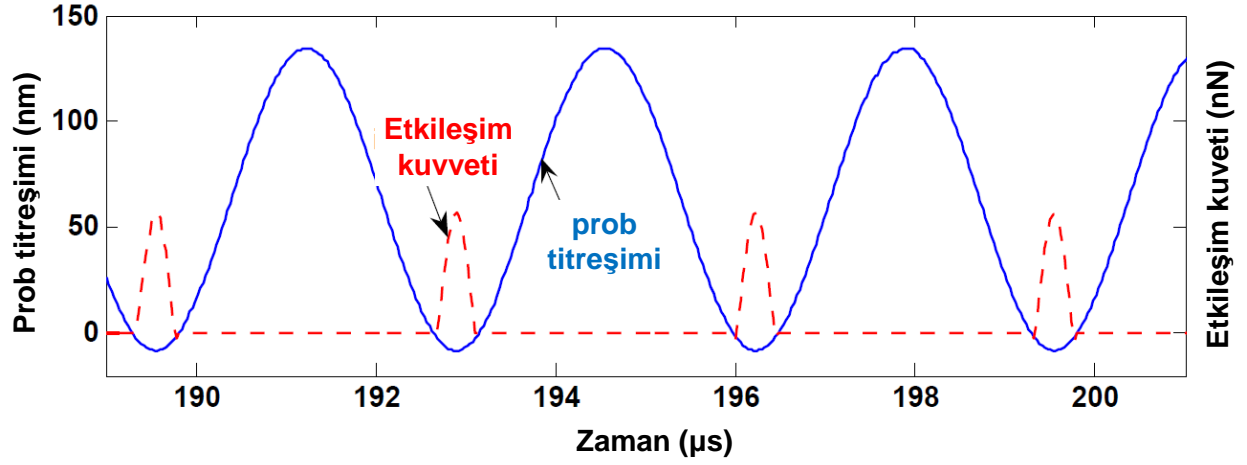
Bu çalışmada, %30'luk bir ölçüm hatasının kabul edilebilir olduğu varsayılmış, ve bu durumda da gerekli olan minimum süre 20 ms olarak bulunmuştur (Şekil 6). Göz önünde bulundurulan bir diğer parametre de yüzeye uygulanan anlık etkileşim kuvvetlerin tepe değeridir. Klasik vurmali-mod simülasyonunda, serbest osilasyon genliği ve ayar noktası değerleri sırasıyla $A_1 = 100$ nm ve $A_{set}/A_1 \approx \%70$ olarak seçilmiş ve geçici kuvvetlerin tepe değeri yaklaşık 60 nN olarak bulunmuştur (Şekil 7).



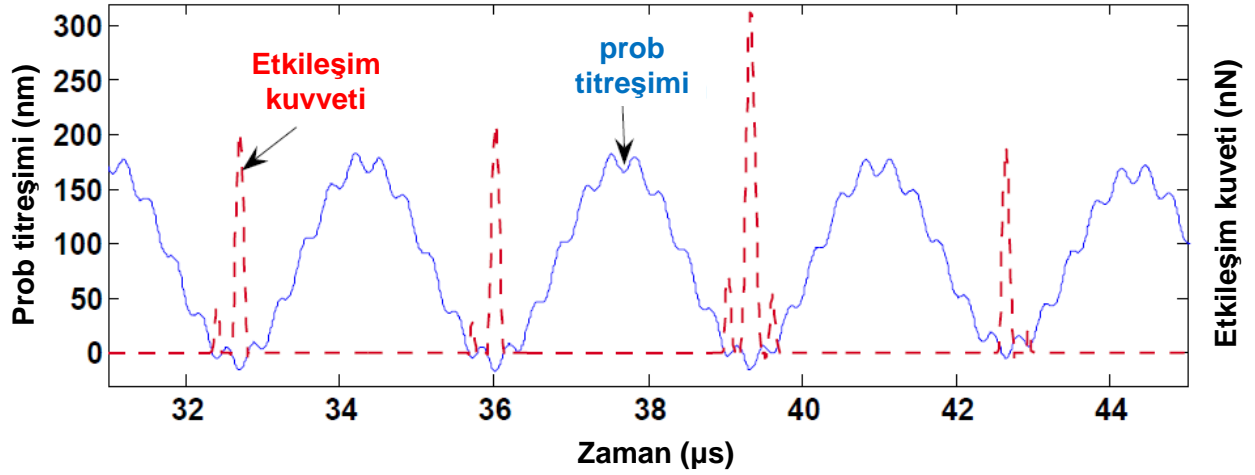
Şekil 6. Geleneksel sistemde elde edilen topografya sinyali.

Yüksek hızlı metodun simülasyonlarında, Z-kontrol devresi gerekli olmadığından kullanılmamıştır. Yüksek frekanslı modun serbest titreşim genliği ve ayar noktası değerleri sırasıyla $A_n = 12$ nm ve $A_{set}/A_n \approx 70\%$ olarak seçilmiştir (GM-AKM sistemi). FM-AKM sisteminde ise, probun yüksek frekanslı modundaki titreşim genliği yine $A_n = 12$ nm olup, ayar noktası ise FM kip çözücü çıkışının maksimum değerinin %80'i olarak seçilmiştir. Aktüasyon aralığı parametresi $0.5 \leq G_{cont} \leq 1$ aralığında seçilmiş, ve birinci modun serbest titreşim genliği de $A_1 = 100$ nm seçildiğinden, aktüasyon limiti 50 nm'dir.

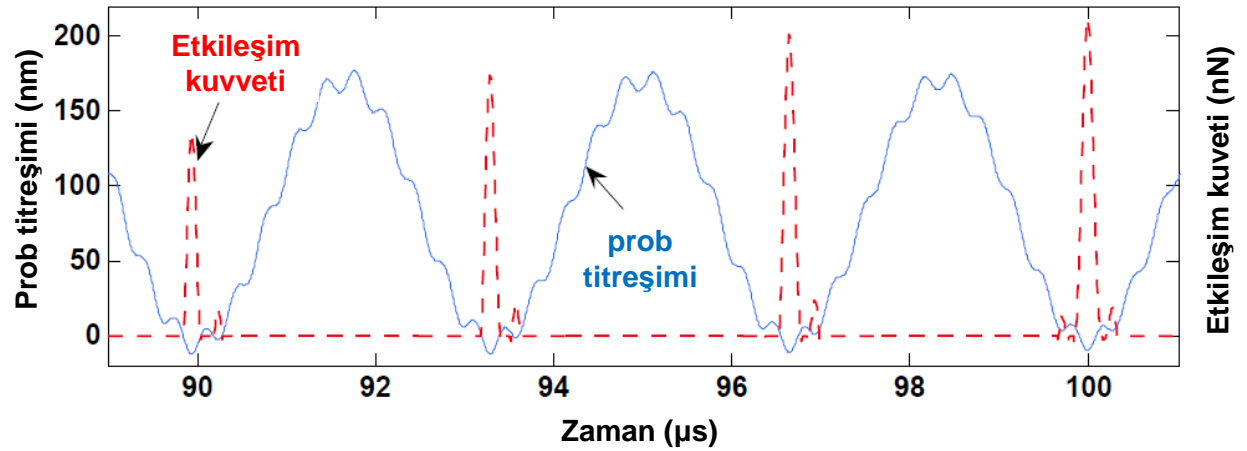
Şekil 8'de, FM-AKM sistemi için zamanda yapılan simülasyondan bir kesit görünmektedir. Anlık etkileşim kuvvetlerinin tepe değeri denek yüzeyinin arttığı kısımda en yüksek değerine ulaşır, yaklaşık 300 nN. Bu da sadece bir osilasyon devrinde oluşur, aksi halde kuvvetin tepe değeri yaklaşık 230 nN olarak gözlemlenmiştir. Geleneksel FM-AKM deneylerinde prob genellikle çekici kuvvetlerin hakim olduğu bölgede titreştirilir, fakat, bizim seçtiğimiz ayar noktası gereğince vurmali-modda olduğu gibi prob itici kuvvetlerin hakim olduğu bölgeye de girmektedir. Görüldüğü gibi geleneksel sistemden farklı olarak prob denek yüzeyine yaklaşırken etkileşim kuvvetleri kısa süreli ve birden fazla tepelere sahip olabilir. Şekil 8'de aynı zamanda 300 kHz'lik 1. moddaki titreşim üzerinde 3 MHz'lik yüksek moddaki titreşim açıkça görülmektedir. Benzer bir prob-denek etkileşimi GM-AKM'nin zamanda yapılan simülasyonlarında da görülmüş, ve anlık kuvvetlerin tepe değeri yaklaşık 210 nN olarak bulunmuştur (Şekil 9).



Şekil 7. Geleneksel sistemde zamana göre elde edilen prob salınım sinyali ve etkileşim kuvvetleri.

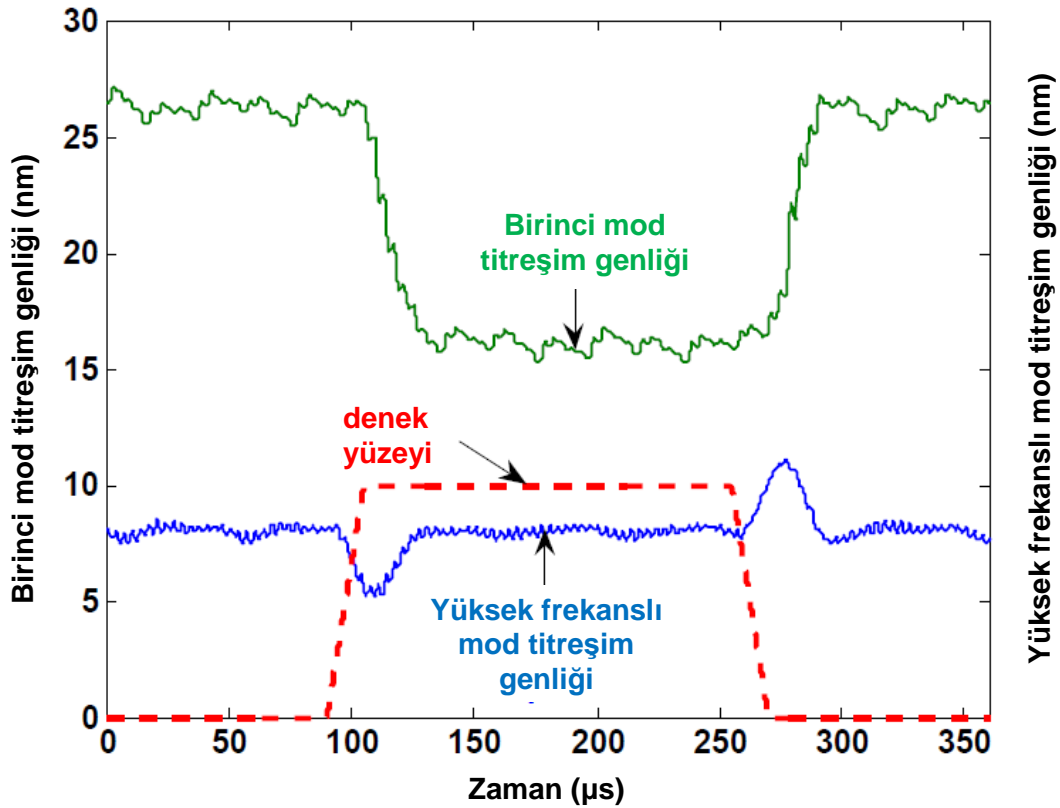


Şekil 8. Yüksek-hızlı FM-AKM sisteminde zamana göre elde edilen prob salınım sinyali ve etkileşim kuvvetleri.



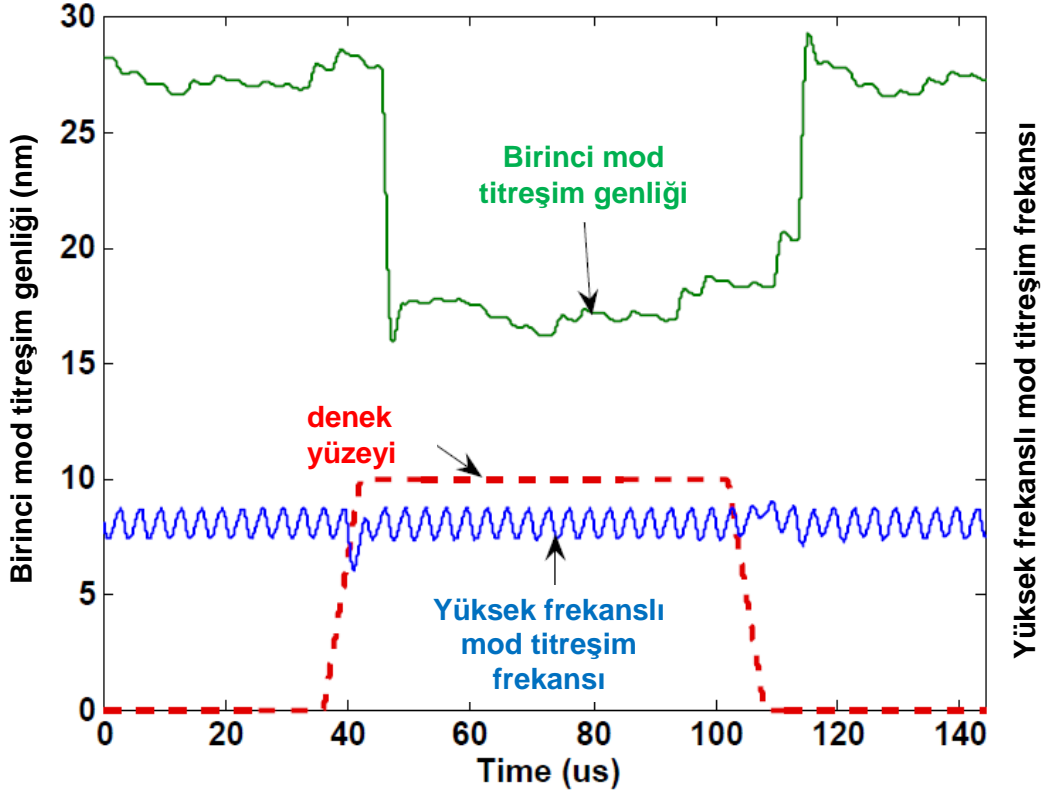
Şekil 9. Yüksek-hızlı GM-AKM sisteminde zamana göre elde edilen prob salınım sinyali ve etkileşim kuvvetleri.

Şekil 10 hızlı GM-AKM sisteminde 10 nm yüksekliğe sahip denek yüzeyi soldan sağa taranırken birinci ve yüksek frekanslı titreşim modlarındaki salınım genliklerinin değişimlerini göstermektedir. Prob yüzey topografyasının artan (veya azalan) kenarından geçerken, yüksek titreşim modundaki osilasyon genliği azalır (veya artar). Genlikteki bu değişim seçilen ayar noktasına göre hata sinyalini oluşturur hata sinyali de PI kontrolörü vasıtasıyla birinci modun osilasyon genliğini değiştirir. Birinci modun azalan osilasyon genliği de probu denekten uzaklaştırarak aktüatör görevini yapar. Birinci modun titreşim genliği şekle sığması için aşağı kaydırılmıştır. Hızlı FM-AKM ile elde edilen sonuç Şekil 11’de sunulmuştur. Bu kez yüksek modun titreşim frekansındaki değişim (hata sinyali) birinci modun osilasyon genliğini değiştirir. Prob yüzey topografyasının artan (veya azalan) kenarından geçerken, yüksek titreşim modundaki osilasyon frekansı azalır (veya artar). Birinci modun osilasyon genliğinin tersini alarak yüzey topografyasını elde edebiliriz. Yine (3) nolu denklemde tanımlanan ölçüm hatasının %30 geçmemesi kaydıyla, veya başka bir ifadeyle bu hata oranı ile elde edilen topografya sinyali denek yüzeyini yeterince doğru tanımlıyorsa, yüksek-hızlı GM-AKM sisteminde gerekli olan minimum zaman $360 \mu s$ (Şekil 12), yüksek-hızlı FM-AFM sisteminde ise aynı denek yüzeyi için bu zaman $144 \mu s$ (Şekil 13) olarak tesbit edilmiştir.



Şekil 10. Yüksek-hızlı GM-AKM sisteminde denek yüzeyi taranırken birinci ve yüksek frekanslı titreşim modlarındaki salınım genliklerinin değişimleri.

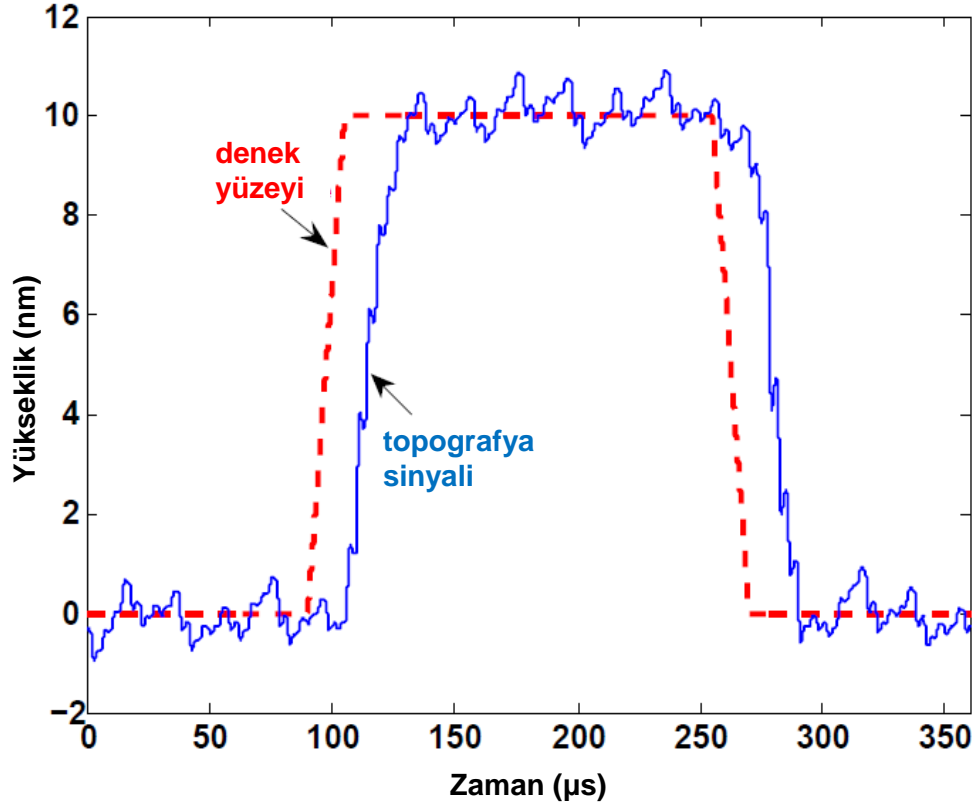
Eğer tanımlanan denek yüzeyini elde etmek için gereken minimum zamanları kıyaslarsak, en az sürenin, yani en hızlı taramanın, yüksek-hızlı FM-AKM metodu ile elde edileceğini görürüz. Eğer geleneksel yöntemle elde edilen zaman süresini, yani en yavaş tarama hızını, yüksek-hızlı FM-AKM metodu ile elde edilen süreye oranlarsak: $20 \text{ ms} / 144 \mu s \approx 140$. Aynı şekilde geleneksel yöntemle elde edilen zaman süresini, yüksek-hızlı GM-AKM metodu ile elde edilen süreye oranlarsak: $20 \text{ ms} / 360 \mu s \approx 55$. Bu sonuçlar bize tarama hızının geleneksel yöntemle göre yaklaşık 100 kat artırılabilceğini gösterir. Burada altı çizilmesi gereken nokta ise bu sonuçların sıradan bir AKM probu ile bile alınabileceği olmasıdır. Diğer önemli bir nokta da bu sonuçların geri beslemeli yöntemle elde edilmiş olmasıdır. Yani geri beslemesiz bir şekilde sadece birinci modun titreşim genliğinin kaydedilmesi durumunda, topografyadaki artışlar sırasında yüzeyi tahrip edilebilir veya prob ucu ile denek yüzeyinin topografya azalışlarında teması kaybolabilir. Ayrıca, tahmin edildiği gibi FM-AKM yöntemiyle elde edilen tarama hızı daha yüksektir.



Şekil 11. Yüksek-hızlı FM-AKM sisteminde denek yüzeyi taranırken birinci modun salınım genliği ve yüksek frekanslı modun titreşim frekansının değişimleri.

Bir sonraki sorulması gereken soru bu zamanların ne ifade ettiğidir. Bir AFM deneyinde esasen baktığımız bir görüntünün (veya çerçeve) alınması için gereken minimum zamandır. Fakat bu zaman piksel sayısı, taranan alanın büyüklüğü ve pürüzlülüğü, ölçüm hatası, vb., gibi bir çok faktöre bağlıdır. Görüntüleme hızını resim/saniye (veya çerçeve/saniye) cinsinden elde etmek için bazı varsayımlarda bulunmamız gerekir. Örneğin 10 nm yüksekliğe sahip izgara şeklinde bir yüzey düşünelim. Ayrıca hızlı tarama ekseninde simülasyonlarda elde ettiğimiz topografyalardan en fazla 5 tane olduğunu varsayalım. Bu durumda, geleneksel vurmali-mod kullanılarak 100×100 piksellik görüntü $20 \text{ ms/topografya} \times 5 \text{ topografya/tarama} \times 100 \text{ tarama/çerçeve} = 10 \text{ saniye/çerçeve}$ hızında alınabilir (görüntünün sadece tek yönde alındığı kabul edilmiştir). Elbette piksel sayısının artırılması, veya bahsi geçen topografyaların daha fazla olması, ki ayrıca bunlar hızlı veya yavaş tarama eksenlerinde periyodik olmak zorunda da değildir, durumlarında görüntüleme zamanını artacaktır. Yani kabaca geleneksel yöntemle bir AKM görüntüsünün, deneylerde de sıklıkla gözlemlendiği gibi, alınması onlarca saniyeden bir kaç dakikaya kadar sürebilir. Öte yandan, önerilen metodu aynı görüntünün alınması FM-AKM sistemi için $144 \mu\text{s} \times 5 \times 100 = 72 \text{ ms}$, GM-AKM sistemi için ise $360 \mu\text{s} \times 5 \times 100 = 180 \text{ ms}$ sürer. Başka bir deyişle, sıradan bir AKM probuyla FM-AKM için yaklaşık olarak 14 çerçeve/sn ve GM-AKM için 5 çerçeve/sn görüntüleme hızlarına ulaşılabilir.

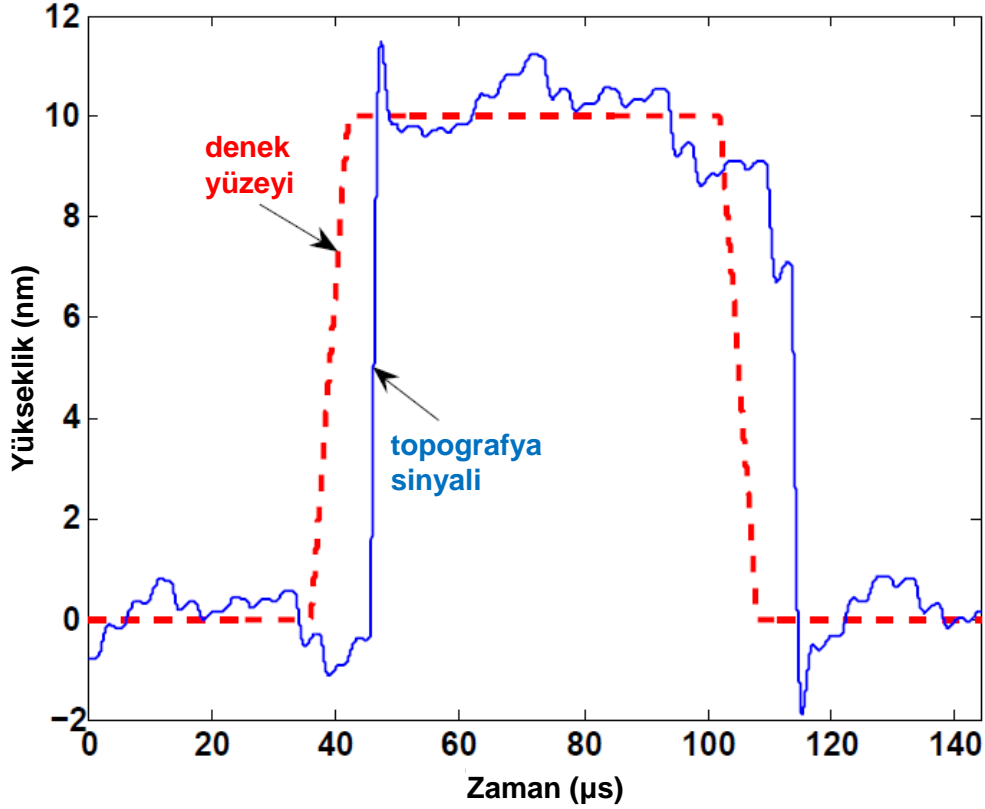
Cevaplanması gereken bir diğer soruda tarama alanının bu hesaplamalarda nasıl hesaba katıldığıdır. Elde edilen minimum zamanlar tarama alanına göre 1 nm, $1 \mu\text{m}$, veya başka bir değere karşılık gelebilir. Dolayısıyla, X-Y tarayıcısının her bir sırayı (topografya uzunluğu / minimum gerekli zaman) hızında tarayabilmesi gerekmektedir. Örnek verecek olursak, toplam tarama uzunluğu $1 \mu\text{m}$ ise, X-Y tarayıcısının hızlı tarama eksenindeki hızı en az $(1 \mu\text{m} / 5) / 144 \mu\text{s} \approx 1.4 \text{ mm/s}$ olmalıdır.



Şekil 12. Yüksek-hızlı GM-AKM sisteminde elde edilen topografya sinyali.

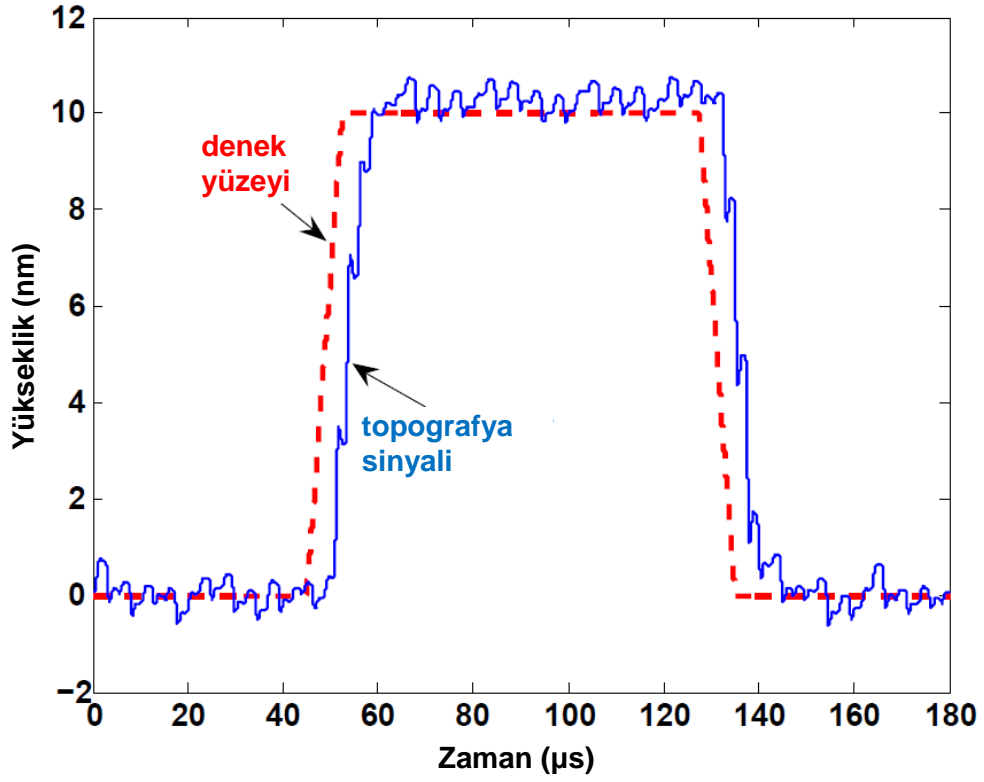
Simülasyonlarda topografya yüksekliğinin ölçüm hatası ve anlık etkileşim kuvvetleri üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Bunun için tarama zamanları ve prob-denek parametreleri değiştirilmeden, 2 nm ve 50 nm yüksekliğindeki deneklerin simülasyonları yapılmıştır. Aktüasyon aralığının yüzey topografyasından büyük olması için 50 nm yüksekliğindeki denğin simülasyonlarında $0.25 \leq G_{cont} \leq 1$ ve $A_1 = 150$ nm olarak seçilmiştir. Bu denğin simülasyon sonuçlarında ölçüm hatasının hem GM-AKM ve hem de FM-AKM için yaklaşık %30 olduğu bulunmuştur. Diğer taraftan, 2 nm yüksekliğindeki denğin simülasyonlarında ölçüm hatası GM-AKM için %54 ve FM-AKM için de %72 olmuştur. Bunun sebebi de topografya sinyallerinde görülen dalgalanmaların etkisinin 2 nm yüksekliğindeki denek üzerinde artmasıdır. Anlık etkileşim kuvvetlerinin maksimum olduğu yerler yine topografyanın artan kenarları olup, bu kuvvetlerin tepe değeri 2 nm yüksekliğindeki denğin simülasyonlarında GM-AKM için 160 nN ve FM-AKM için 240 nN olmuş, 50 nm yüksekliğindeki denğin simülasyonlarında ise, 600 nN (GM-AKM) ve 760 nN (FM-AKM) değerlerine ulaşmıştır.

Denek sertliğinin etkisini görmek için 2 ayrı elastikiyette ($E_r = 0.1$ GPa ve $E_r = 10$ GPa) ve yüksekliği yine 10 nm olan denekle simülasyonlar tekrarlanmıştır. Aynı tarama zamanları için, GM-AKM sisteminde ölçüm hatası her iki denek için de %35'in altında çıkmıştır, bununla birlikte tepe kuvvetleri 60 nN (0.1 GPa) ve 400 nN (10 GPa) civarındadır. FM-AKM sisteminde ise ölçüm hatası her iki denek için de %38'in altında çıkmıştır, tepe kuvvetleri ise 80 nN (0.1 GPa) ve 600 nN (10 GPa) olmuştur. 0.1 GPa'lık denğin simülasyonlarında denğe girintiyi azaltmak için ayar noktası çok az artırılmıştır. Esasen yumuşak denekler için yumuşak, sert denekler için de sert problemlerin kullanılması daha uygundur (BALANTEKİN, 2005). Seçilen probun rezonans frekansı ve Q-faktörü değiştirilmeden, yay sabiti her iki titreşim modu için de 10 kat azaltılmış ve etkisine and 1 GPa'lık denek üzerinde bakılmıştır. Bu durumda tepe kuvvetlerinin GM-AKM sisteminde yaklaşık 40 nN'a ve FM-AKM sisteminde de 60 nN'a düştüğü görülmüştür.

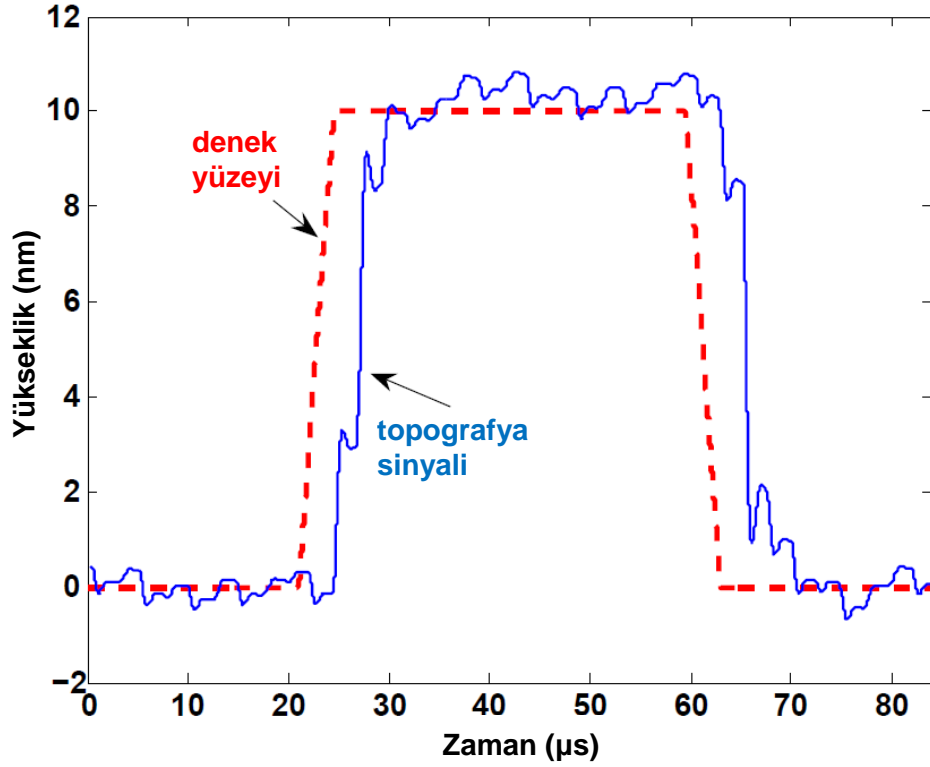


Şekil 13. Yüksek-hızlı FM-AKM sisteminde elde edilen topografya sinyali.

Şekil 12 ve 13'te görüldüğü gibi elde edilen topografya sinyalleri denek yüzeyinin düz olduğu kısımlarda dalgalanma göstermektedirler. Ayrıca Şekil 11'de yüksek frekanslı modun titreşim frekansı da ayar noktası etrafında salınmaktadır. Bunun sebebi genlik ve frekans dedektörlerinde kullanılan filtrelerin ideal karakteristiğe sahip olmamalarıdır. Prob osilasyonu iki frekanstan oluştuğundan, bunları filtrelerle ayırmamız gerekmektedir. Fakat bu frekanslar birbirlerinden çok uzak olmadığından, pratikte kullanılan filtrelerle bu iki frekans teriminin (300 kHz ve 3 MHz) ideal bir şekilde ayrılması mümkün değildir. Topografya sinyali de birinci moddaki titreşim genliğinin tersi alınarak elde edildiğinden, bu dalgalanmalar topografya sinyallerinde de görünmektedirler. Bu dalgalanmanın tepe değeri GM-AKM sisteminde yaklaşık 0.8 nm ve FM-AKM sisteminde 1 nm civarındadır. Bu dalgalanmalar 2 nm yüksekliğindeki denekte de görüldüğü gibi düşük yükseklikteki yüzey yapılarında yüksek ölçüm hatası oluşturmaktadır. Birinci ve yüksek titreşim modlarının rezonans frekanslarının ölçüm hatasına olma etkisi de incelenmiştir. Hem birinci rezonans frekansının değeri artırılıp hem de birinci ve yüksek frekanslı modun rezonansları birbirlerinden biraz daha artırılarak, $f_1 = 600$ kHz ve $f_n = 12$ MHz değerleriyle yeni simülasyonlar yapılmıştır. Elde edilen topografya sinyalleri GM-AKM ve FM-AKM için sırasıyla Şekil 14 ve 15'te görülmektedir. Bu durumda aynı yüzey topografyasını elde etmek için gerekli olan minimum süre AM-AKM sisteminde 180 μ s, FM-AKM sisteminde 84 μ s olmuştur. Yine bu durumda GM-AKM ve FM-AKM için ölçüm hataları sırasıyla %20 ve %27 olmuş, ayrıca dalgalanmaların tepe değerleri de 0.5 nm ve 0.7 nm'ye düşmüştür. Bu sonuçlar göstermektedir ki daha iyi görüntü kalitesi, birinci ve yüksek frekanslı modların rezonansları birbirlerinden ayrıldıkça elde edilebilir, ve de tarama hızı yüksek rezonans frekanslı problemlerle daha da artırılabilir. Analizlerde seçilen frekans değerlerinin yanlış anlaşılması için bahsedilmeye değer bir diğer nokta da yüksek frekanslı modun rezonansının birinci modun tam katı olmasına gerek olmadığıdır. Simülasyonlar $f_1 = 300$ kHz ve $f_n = 3.5$ MHz parametreleriyle tekrarlanmış ve orijinal sonuçlara nispeten daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.



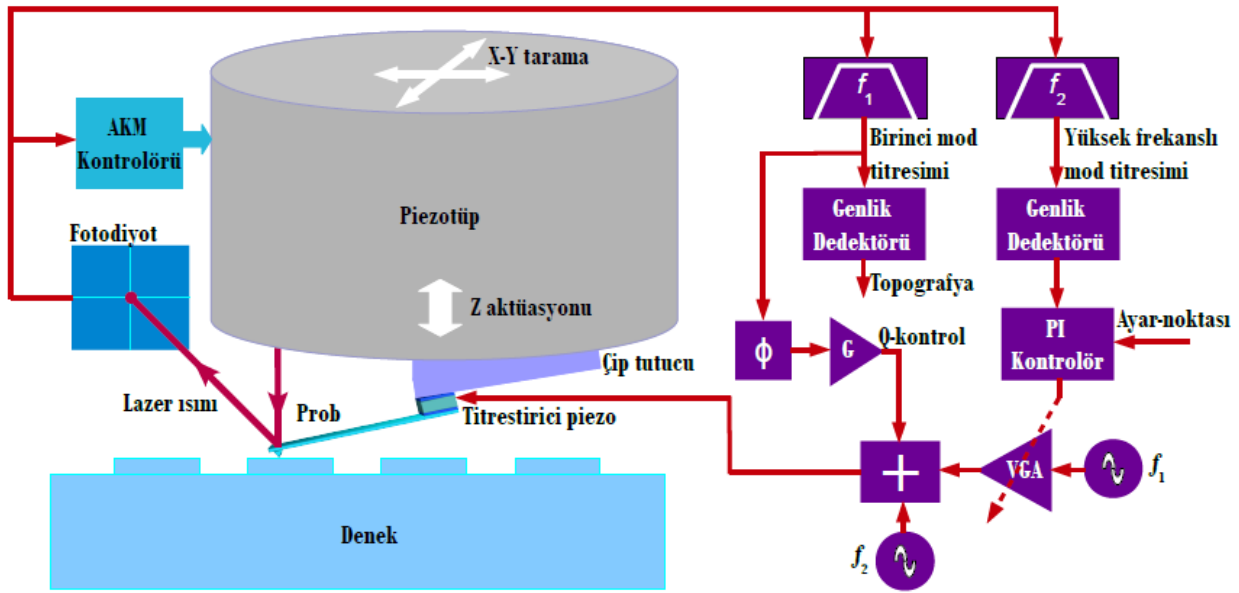
Şekil 14. Yüksek-hızlı GM-AKM sisteminde elde edilen topografya sinyali ($f_1 = 600$ kHz ve $f_n = 12$ MHz).



Şekil 15. Yüksek-hızlı FM-AKM sisteminde elde edilen topografya sinyali ($f_1 = 600$ kHz ve $f_n = 12$ MHz).

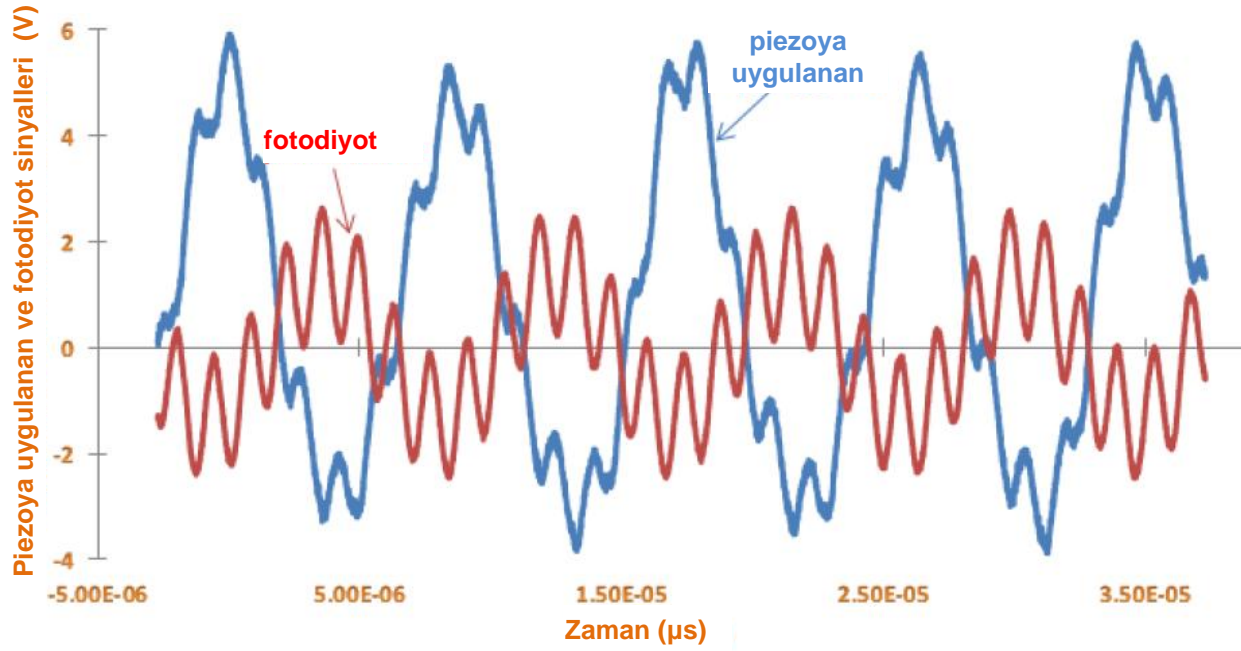
Deneyler

Önerilen yüksek hızlı metod Şekil 16'da görüldüğü gibi hayata geçirilmiştir (Bkz. Ek 1). Deneylerde kullanılan ticari AKM sistemi genlik modülasyonlu moda çalıştığı için metodun GM-AKM versiyonu kullanılmıştır. Fotodiyot sinyali dahili AKM kontrolörünün girişi olup, bu kontrolör geleneksel yöntemde piezotüpün hem X-Y taramasını hem de Z-aktüasyonunu kontrol eder. Fotodiyot sinyali ayrıca merkez frekansları probun birinci (f_1) ve yüksek (f_2) modundaki rezonans frekanslarına eşit olan iki bant-geçirici filtreye bağlanmıştır. Filtre çıkışları iki tane genlik dedektörüne bağlanmıştır. Yüksek frekanslı modun titreşim sinyali algılayıcı olarak kullanıldığından, bu sinyalin genliği PI kontrolörüne bağlıdır. PI kontrolör çıkışı ayarlanabilir kazanç devresini (VGA) kontrol ederek birinci titreşim modunun (f_1) genliğini yüzey topografyasındaki değişimlere göre kontrol eder. Q-kontrol devresi kazanç (G) ve faz kaydırıcısı (ϕ) bloklarının ardarda bağlanmasıyla elde edilmiştir. Q-kontrol devresi çıkışı, VGA çıkışı, ve yüksek frekanslı uyarıcı sinyali (f_2) toplanarak probu titreştiren piezoya uygulanan sinyal elde edilir.

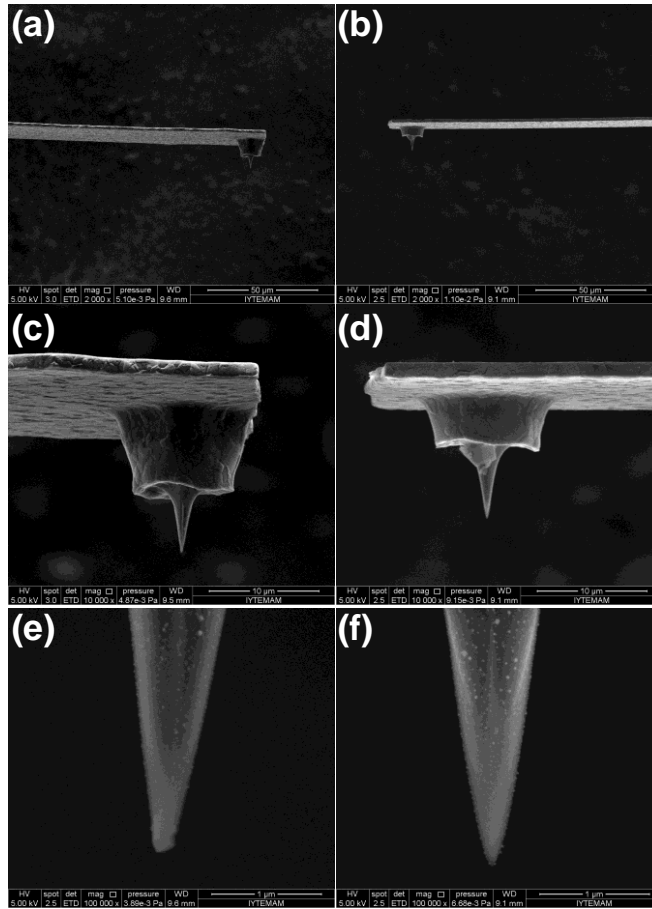


Şekil 16. Deney düzeneği.

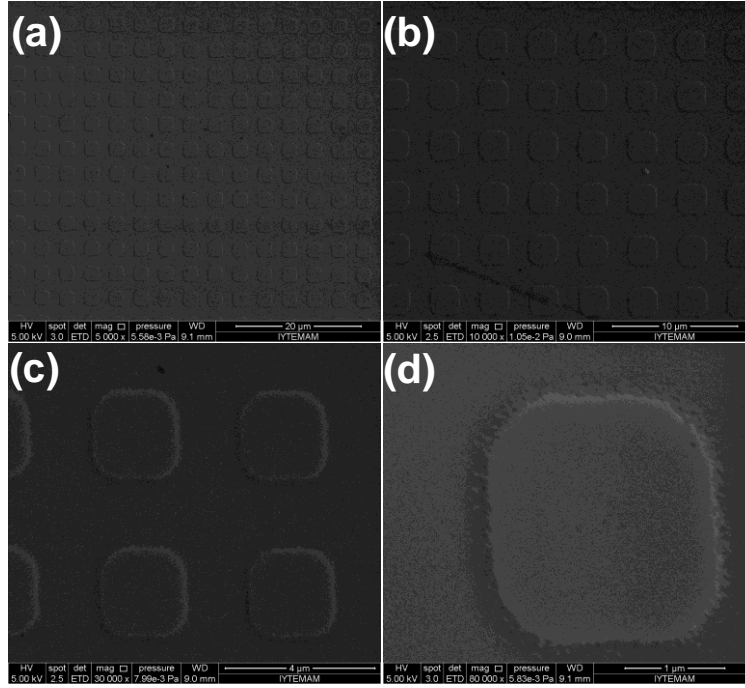
Deneyler Veeco'nun Dimension 3100 AKM sistemi üzerinde yapılmıştır. Fotodiyot sinyalini (Bkz. Şekil 17) almak ve probu titreştiren piezoya sinyal uygulamak için Signal Access Module kullanılmıştır. Sistem için gerekli elektronik parçalar piyasadan hazırca temin edilebilecek olup, kazanç, faz, ve ayar noktası gibi parametrelerin ayarlanması için potansiyometreler kullanılmıştır. Proje yürütücüsünün geliştirdiği tepe dedektörü daha hızlı çalışmakla beraber (BALANTEKİN, 2011), deneylerde kolaylık açısından zarf dedektörü kullanılmıştır. Analog Devices'ın AD603 test kiti VGA olarak kullanılmıştır. Sistem elektronisinin resmi Ek 2'de sunulmuştur. Deneylerde kullanılan prob NT-MDT şirketinin ürettiği HA-NC etalon prob olup, birinci ve ikinci modlarının rezonans frekansları sırasıyla $f_1 = 113$ kHz ve $f_2 = 725$ kHz olarak ölçülmüştür. Bu probun seçilmesinin nedeni birinci ve ikinci titreşim modlarının rezonans frekanslarının kullanılan ticari AKM sisteminin bant genişliği içerisinde yer almalarıdır. Deneylerden sonra kullanılmış olan probun ve aynı modelden hiç kullanılmamış olan probun değişik ölçeklerde SEM mikrografları Şekil 18'de sunulmuştur. Deneylerde Nanoscience Instruments'ten 4 μm periyotlu ve kare şeklinde 25 nm yüksekliğe sahip, silikon kalibrasyon deneği kullanılmıştır (Şekil 19). Bu denek simülasyonlardakine benzer özellikte yüzey topografyasına sahip olması nedeniyle tercih edilmiştir.



Şekil 17. Zamana göre fotodiyot sinyali ve probu titreştiren piezoya uygulanan sinyal.

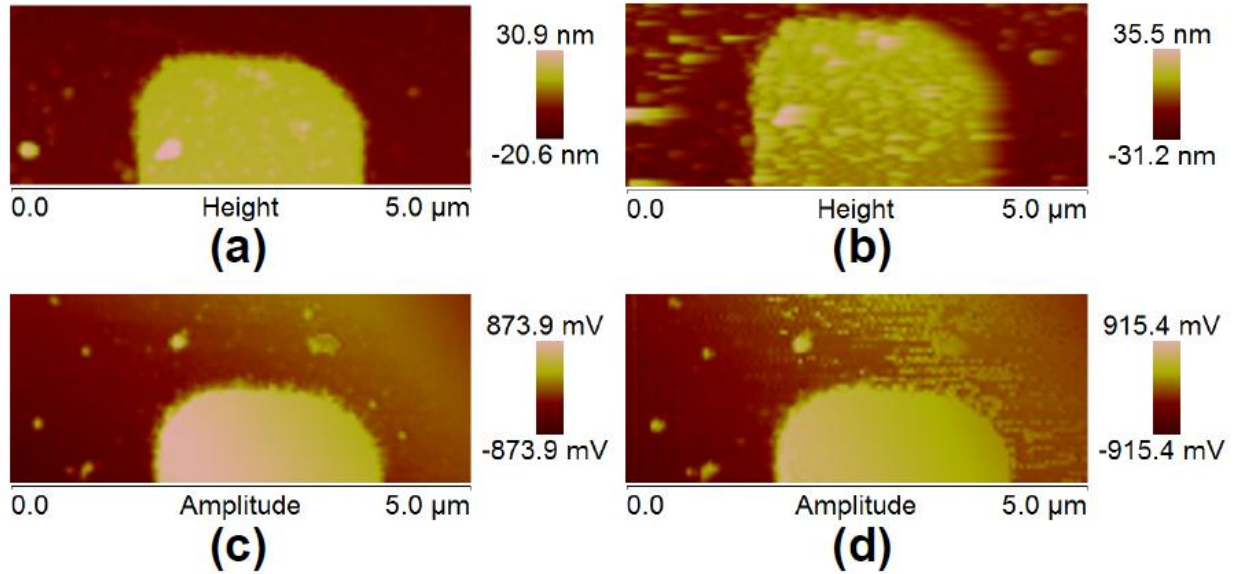


Şekil 18. Değişik ölçeklerde deneylerde kullanılmış (a,c,e) ve kullanılmamış (b,d,f) probun SEM mikrografları.



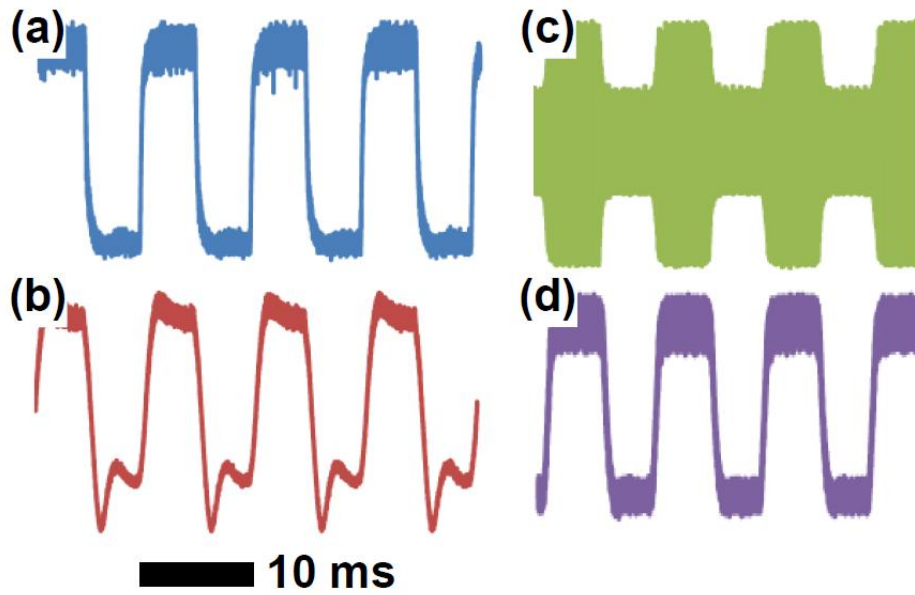
Şekil 19. Değişik ölçeklerde deneylerde kullanılmış deneğin SEM mikrografıları.

Geleneksel vurmali-mod ile elde edilen topografya görüntüleri Şekil 20 (a) ve (b) de sunulmuştur. Geleneksel yöntemde piezo titreştirici sinyali sadece birinci mod osilasyonunu ihtiva eder. Deneylerde serbest osilasyon genliği ve ayar noktaları yaklaşık olarak 30 nm ve %70% seçilmiştir. Z-aktüasyonu piezotüp ile gerçekleşmektedir. Taramadan önce dahile AKM PI kontrolörünün kazancı sistem kararsız olmayacak kadar artırılmıştır. Sonuçlardan da görüldüğü gibi tarama hızı 1 Hz'den (a) 10 Hz'e (b) arttırıldığında aktüatör yüzeyi takip edemediğinden görüntü bozulmuştur. Buna ilaveten yüzey şeklinin hafifçe yukarıya doğru kaydığı ve topografya aralığının da yaklaşık %13 değiştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 20. Kalibrasyon deneğinin topografya görüntüleri. Geleneksel yöntem ile (a) 1 Hz ve (b) 10 Hz tarama hızlarında. Projede önerilen metod ile (c) 0.5 Hz ve (d) 10 Hz tarama hızlarında.

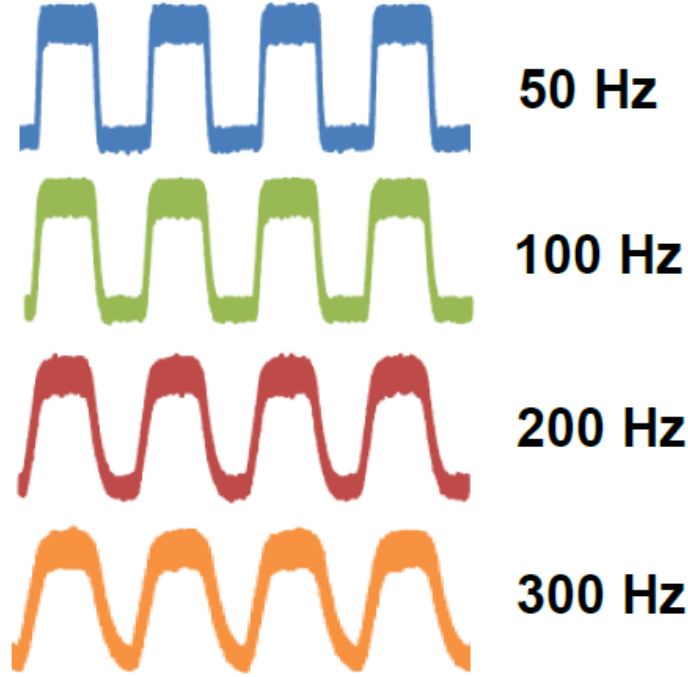
Şekil 20 (c) ve (d) önerilen yüksek-hızlı metod ile alınan genlik (hata sinyali) görüntülerini göstermektedir. Bu kez dahili AKM kontrolörü yalnız X-Y taramasını kontrol etmekte ve de piezotüpün gerçekleştirdiği Z-aktüasyonu dahili PI kontrol kazancının sıfırlanmasıyla etkisiz bırakılmıştır. İdeal olarak birinci modun titreşim genliğini ölçen genlik dedektörünün çıkış voltajı topografyanın tam tersi ile doğru orantılı olarak değişmelidir. Ayrıca dahili PI kontrolörünün kazancı sıfırlandığından, AKM sisteminin birinci modun frekansında ölçtüğü genlik ile seçilen ayar noktası arasındaki farkta (hata sinyali) yüzey topografyasıyla orantılıdır. Harici olarak AKM sistemine verilen birinci modun titreşim genliğini görüntüleme imkanımız olmadığından, bu alternatiflerden ikincisini kullandık. Yapılan deneylerde ikinci modun serbest osilasyon genliği yaklaşık 10 nm seçilmiştir. Birinci modun titreşim genliği de yaklaşık 100 nm ile 200 nm arasında değiştirilebilmektedir. Şekil 17'de VGA kazancı dolayısıyla birinci mod titreşim genliği yüksek iken, yani prob deneye yaklaştırılmışken, piezoyu titreştiren sinyali görmekteyiz. Aynı şekilde, birinci moddaki titreşim üzerinde ikinci moddaki titreşim fotodiyot sinyalinde net bir şekilde görülmektedir. Kazanç kontrol (VGA çıkışı) ve piezo uyarıcı sinyallerinin tarama sırasındaki osiloskop görüntüleri Ek 8'de verilmiştir. Dikkate değer bir nokta ise ikinci modun titreşim genliğinin birinci moda görece yakın görünmesidir. Bunun sebebi deneylerden önce genlik kalibrasyonu için yapılan ölçümlerden de anlaşıldığı üzere ikinci modun daha fazla hassasiyete sahip olmasıdır. Şekil 20 (c) ve (d)'de görüldüğü gibi tarama hızı 0.5 Hz'den (c) 10 Hz'e (d) çıkarıldığında görüntü sağ üst kısımlarda bozulmaktadır. Ayrıca kaydedilen genlik aralığı da yaklaşık %5 artmıştır. Aynı denek üzerinde geleneksel ve önerilen yöntemle değişik hızlarda alınan görüntülerin videoları Ek 3-7'de verilmiştir.



Şekil 21. Q-kontrol devresi ayarının tarama hızına etkisi. (a) 100 Hz'de, %50 oranında modüle edilmiş ikinci modun titreşim genliği. (b) İyi ayarlanmamış Q-kontrol ile elde edilen birinci modun titreşim genliği. Ayarlanmış Q-kontrol ile elde edilen (c) VGA çıkışı, ve (d) Birinci modun titreşim genliği.

Daha önceden de belirtildiği gibi geleneksel bir AKM sistemi hızlı X-Y tarayıcısı olmadığından, önerilen metod ile kazanılan yüksek hız avantajını tam olarak gösteremez. Bu yüzden önerilen metod ile ne kadar hızlı tarayabileceğimizi bulmak için, Şekil 21 (a)'da görüldüğü gibi prob denek yüzeyine temas etmez haldeyken, ikinci modun titreşimini belirli frekanslarda %50 modüle ettik. Böylelikle üretilen suni hata sinyaline birinci modun titreşim genliğinin verdiği karşılık Şekil 21 (b)'de görülmektedir. Bu durumda modülasyon frekansı 100 Hz'dir. Bu tepkinin Q-kontrol devresi kazanç ve fazı iyi ayarlanmadığı için yeterince iyi olmadığı görülmüştür. Q-kontrol devresi parametreleri yeniden ayarlandıktan sonra elde edilen VGA çıkışı, yani uyarıcı sinyal, ve birinci modun titreşim genliğinin verdiği tepki Şekil 21 (c) ve (d)'de sunulmuştur. Modülasyon frekansı 50 Hz'den 300 Hz'e kadar artırılmış ve elde edilen birinci modun titreşim genliği Şekil 22'de verilmiştir. Görüldüğü gibi modülasyon frekansı 200 Hz'e kadar birinci modun tepkisinde çok fazla bir bozulma olmadan artırılabilir. Yüksek hızlı GM-AKM simülasyonlarında,

300 kHz rezonans frekansı olan prob ile 10 nm topografyası olan yüzeyi taramak için gerekli olan minimum sürenin 360 μ s olduğunu bulmuştuk. Aynı zamanda taram hızı ya da başka bir ifadeyle görüntüleme bant genişliğinin de yaklaşık olarak probun rezonans frekansı ile doğru orantılı değiştiğini tespit etmiştik. Bu veriler ışığında 113 kHz rezonans frekansına sahip prob için maksimum modülasyon frekansı $(1 / 360 \mu\text{s}) \times (113 \text{ kHz} / 300 \text{ kHz}) \approx 1 \text{ kHz}$ olmalıdır. Bu da bize sistem elektronğunun bu deneyde optimum düzeyde çalışmadığını göstermektedir.



Şekil 22. Değişik frekanslarda modüle edilmiş ikinci modun titreşimine, birinci modun genliğinin verdiği tepkiler.

Kullandığımız deney düzeneğinin dezavantajlı yönü prob-denek angajman işleminin zorluğudur. Şekil 18 (e)'de kullanılan prob ucunun körelendiği görülmüştür. Bu görüntü geleneksel yöntemde geri beslemenin devre dışı bırakılarak yüzeyin tarandığı, ayar noktasının gerekli prob-denek angajmanı için geleneksel ve önerilen metotta oldukça düşürüldüğü bir çok görüntüleme deneyinden sonra alınmıştır. Yani prob ucunun körelmesi kesin bir nedene bağlanmamakla birlikte kullanılan düzeneğin angajman problemine bir kanıt teşkil eder. Önerilen metoda kıyaslama amacıyla yapılan geri beslemesiz geleneksel görüntüleme deneyinde 1 Hz tarama hızında dahi probun denek yüzeyini takip edemediği görülmüştür. Metod için gerekli elektronik geleneksel sisteme uyacak şekilde kurulduğu için Q-kontrol, PI kontrol, ve ayar noktası parametreleri görüntüleme deneylerinde optimum şekilde ayarlanamamıştır. Ayrıca denek yüzeyindeki eğim ve üzerindeki toz parçacıkları dikkate alınması gereken unsurlardır. Dahili PI kontrolörün kazancını sınırlamak yerine AKM'nin piezotüp aktüatörünün düşük frekanslı topografya değişimleri ve yüzeydeki eğimi kompanse edecek kadar bir kazanç seçmek daha iyi bir yöntem olabilir. Öyle bir durumda da topografya sinyali, prob ve piezotüp tarafından gerçekleştirilen aktüasyon sinyallerinin toplanmasına elde edilecektir. Tüm bu faktörlere rağmen, önerilen metodun kanıtlama deneyi yapılmış ve 10 Hz tarama hızında denek yüzeyinin nisbeten daha iyi bir görüntüsü elde edilmiştir.

Sonuç

Nanoteknoloji alanındaki ilerlemeler, 21. yüzyılda elektronik, tıp, üretim, ve enerji alanlarında devrimsel gelişmelere yol açacaktır. Nanoparçacıklarla teşhis ve tedavi, moleküler anahtarlar, nanoyapılı katalizörler bu teknolojinin sunduğu umut verici birkaç örnektir. Bu gelişmelere ivme kazandırmak için, nano yapıların ve sistemlerin büyük ölçekli üretimi ve düzenlenmesi ile, modern metroloji ve karakterizasyon metod ve cihazlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Atomik Kuvvet Mikroskopu Nanoteknoloji alanında kullanılan en önemli cihazlardan birisidir.

Bu projde sıradan bir AKM probunun hem sensör hem de aktüatör gibi kullanıldığı, geri beslemeli, yüksek-hızlı ve dinamik bir işletim metodu geliştirdik. Bu metod Q-kontrollü birinci titreşim modunu aktüatör gibi kullanarak, geleneksel sistemlerde kullanılan hantal piezotüpün dezavantajını gidermiştir. Bu metod bir elektronik sistem olarak üretilebilir ve halihazırda kullanılan atomik kuvvet mikroskoplarına harici bir cihaz gibi bağlanarak tarama hızlarını arttırabilir. Yeni üretilecek atomik kuvvet mikroskoplarının içine de entegre edilebilir. Kısaca, Nanoteknolojide yüksek hızlı tarama ve görüntüleme ihtiyacı olan bütün uygulamalar için bu yöntemden yararlanılabilir.

Metodun en önemli deavantajı ise sistem elektroniğinin geleneksel sistemlere göre daha karmaşık olmasıdır. Bir diğer dezavantaj, yüksek frekanslı titreşim modu algılamada kullanıldığı için anlık etkileşim kuvvetlerinin tepe değerlerinin artması olabilir. Bu sorun daha yumuşak problemler ile çözülebilir. Başka bir dezavantaj ise aktüasyon aralığının piezotüp'e göre küçük olmasıdır, fakat, hızlı aktüasyon için küçük boyutlu aktüatör kullanmamız mecburidir.

Önerilen metod modellenmiş ve geleneksel yöntemle birlikte keskin kenarlara sahip olan aynı denek yüzeyi üzerinde nümerik simülasyonları yapılmıştır. Böylece analitik veya deneysel olarak kolayca yapılamayacak olan önerilen metodun değerlendirilmesi ve geleneksel yöntemle doğru bir şekilde kıyaslaması yapılmıştır. Metod değişik prob ve denek parametreleri için tarama hızı, yüzeye uygulanan anlık kuvvetlerin tepe değeri, ve ölçüm hatası açılarından incelenmiştir. Sıradan bir AKM probuyla bile görüntüleme hızının geleneksel dinamik-AKM görüntüleme yöntemine kıyasla 100 kat mertebesinde arttırılacağı gösterilmiştir. Ayrıca, görüntüleme hızının yüksek rezonans frekanslı problemler kullanılarak daha fazla arttırılabileceği gösterilmiştir.

Düşük yay sabitli ve yüksek rezonans frekanslı küçük problemler kullanılarak hem tarama hızını daha da arttırabilir hem de yüzeye uygulanan kuvvetleri düşürebiliriz. Ticari olarak 5 MHz rezonans frekanslı problemlerin üretimi yapılmaktadır. Yüksek hızlı dinamik AKM alanında çalışan bazı araştırmacılar yay sabiti 1 N/m'den az ve rezonans frekansı 1 MHz'den büyük olan problemleri kendi sistemlerinde kullanmışlardır (FANTNER, 2006; ANDO, 2012). Tarama boyutu 200 nm olan bir yüzeyin 100 x 100 piksellik görüntüsünü, yay sabiti 0.2 N/m ve rezonans frekansı 1.2 MHz olan bir proba almak için en yüksek hız teorik olarak 25 çerçeve/sn olarak öngörülmüştür. Bu öngöründe kullanılan Z-aktüatörünün bant genişliği ise 370 kHz, aktüasyon aralığı da 1 µm olarak rapor edilmiştir (ANDO, 2012). Aynı probun önerdiğimiz metotta kullanılmasıyla 1.2 MHz aktüasyon bant genişliğine ulaşılabilir. Analizlerimiz metodun FM-AKM sisteminde kullanımıyla, aynı piksel değeri için görüntüleme hızının 300 kHz rezonans frekansında bir prob ile yaklaşık 14 çerçeve/sn olduğunu göstermiştir. Eğer 600 kHz rezonans frekansında bir prob kullanılırsa görüntüleme hızı belirlenen koşullarda teorik olarak $(144 \mu s / 84 \mu s) \times 14 \text{ çerçeve/sn} \approx 24 \text{ çerçeve/sn}$ olacaktır. Dolayısıyla literatürde yüksek-hızlı dinamik-AKM çalışmalarında kullanılan 1.2 MHz rezonans frekanslı probun önerdiğimiz metod ile kullanımıyla görüntüleme hızı 24 çerçeve/sn'den daha iyi olacaktır.

Her ne kadar literatürde verilen en iyi teorik sonuç 25 çerçeve/sn olsa da, yapılan araştırmalar ve görüşmeler neticesinde günümüzde kullanılan yüksek-hızlı dinamik-AKM hızlarının yapılan deneylerde tipik olarak 10 çerçeve/sn'nin altında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca görüntü kaliteleri de tartışmaya açıktır. Dolayısıyla esas hedef olan 1-10 ms/çerçeve tarama hızlarına ulaşılması için daha iyi sistemler geliştirilmelidir. Bunun için de ilk önce bu hızlarda tarama yapabilecek X-Y tarayıcılarının geliştirilmesidir. Yakın zamanda bazı araştırma grupları bu tür tarayıcıları temas modunda çalışan AKM sistemleri için

geliştirmişlerdir (HUMPHRIS, 2005; BRAUNSMANN, 2010). Dolayısıyla, rezonans frekansı 5 MHz olan problemlerin ve hızlı X-Y tarayıcılarının sisteme entegrasyonu ile önerdiğimiz metod dinamik-AKM görüntülemesinde 1-10 ms/çerçeve tarama hızlarını mümkün kılabilir. Bu durumda karşılaşılabilecek problem ise birinci ve yüksek frekanslı moddaki titreşimleri algılamak için kullanılan fotodiyotun bant genişliği olarak görülmektedir.

Metod için gerekli elektronik devreler tasarlanmış ve geleneksel bir AKM sistemi üzerinde kanıtlama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler Georgia Institute of Technology'de yapılmış ve deney sonuçları görüntüleme hızının geleneksel görüntüleme yöntemine göre önemli ölçüde arttırılabileceğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar konferanslarda sunulmuş ve bu alanda çalışan araştırmacı ve şirketlerin ilgisini çekmiştir. Bazı araştırmacı ve şirketlerle metodu kullanan sistemlerin uluslararası bir proje kapsamında geliştirilmesi veya halihazırda kullanılan AKM sistemlerine entegrasyonunu sağlayacak modüllerin tasarlanması konusunda ortak çalışmaların yapılabileceği görülmüştür. Önerilen metodun patent başvurusu TPE'ye yapılmış ve metodun açıklandığı teorik ve deneysel makaleler değerlendirilmek üzere SCI indeksinde yer alan bir dergiye gönderilmiştir.

Geliştirildiği günden günümüze AKM maddelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin incelenmesinden atomik manipülasyona, insan kromozomlarının karakterizasyonundan nano litografiye kadar pek çok farklı alanda uygulanmıştır. Dolayısıyla, bu projenin sonuçları genel olarak Nanoteknoloji, Moleküler Biyoloji, ve Malzeme Bilimleri gibi alanlarda çalışan araştırmacılara önemli katkılar sağlayacaktır. Yüksek hızlı ve tahribatsız endüstriyel nano metroloji ve manipülasyon, biyomoleküler etkileşimlerin gerçek-zamanlı gözlemlenmesi, ve yeni nanomakinelerin nasıl tasarlanacağı hakkında bilgi sahibi olmak için biyolojik hücrelerin üretmiş olduğu biyo-nanomakinelerin çalışırken incelenmesi gibi teknolojik olarak henüz çözülememiş konular da proje sonuçlarının etki edeceği çok önemli uygulamalardır.

Referanslar

- Akiyama T., Stauffer U., Rooij N. F., *Rev. Sci. Instrum.* 73, 2643 (2002).
- Albrecht T. R., Grutter P., Horne D., Rugar D., *J. Appl. Phys.* 69, 668 (1991).
- Ando T., Uchihashi T., Fukuma T., *Prog. Surf. Sci.* 83, 337 (2008).
- Ando T., *Nanotechnology* 23, 062001 (2012).
- Antognozzi M., *ve ark.*, *Appl. Phys. Lett.* 82, 2761 (2003).
- Balantekin M., Atalar A., *Appl. Surf. Sci.* 205, 86 (2003).
- Balantekin M., Atalar A., *Phys. Rev. B* 71, 125416 (2005).
- Balantekin M., Degertekin F. L., *Ultramicroscopy* 111, 1388 (2011).
- Bhushan B., *Handbook of Micro/Nanotribology*, CRC, Boca Raton, Florida, (1999).
- Binnig G., Quate C. F., Gerber C., *Phys. Rev. Lett.* 56, 930 (1986).
- Braunsmann C., Schäffer T. E., *Nanotechnology* 21, 225705 (2010).
- Degertekin F. L., *ve ark.*, *Appl. Phys. Lett.* 87, 213109 (2005).
- Fantner G. E., *ve ark.*, *Ultramicroscopy* 106, 881 (2006).
- Garcia R., Perez R., *Surf. Sci. Rep.* 47, 197 (2002).

Humphris A. D. L., Miles M. J., Hobbs J. K., *Appl. Phys. Lett.* 86, 034106 (2005).

Igarashi K., *ve ark.*, *Science* 333, 1279 (2011).

Kodera N., *ve ark.*, *Nature* 468, 72 (2010).

Manalis S. R., Minne S. C., Quate C. F., *Appl. Phys. Lett.* 68, 871 (1996).

Naitoh Y., *ve ark.*, *J. Vac. Sci. Technol. B* 28, 1210 (2010).

Schitter G., Allgower F., Stemmer A., *Nanotechnology* 15, 108 (2004).

Sulchek T., *ve ark.*, *Rev. Sci. Instrum.* 71, 2097 (2000).

Ueyama H., Sugawara Y., Morita S., *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.* 66, S295 (1998).

Zhao B., *ve ark.*, *Rev. Sci. Instrum.* 80, 093707 (2009).

Ekler

1. AKM deney düzeneği (AFM_system.jpg)
2. Sistem elektroniği (Electronics.jpg)
3. Geleneksel yöntemle 1 Hz tarama hızında görüntüleme (Conventional_1Hz.mpg)
4. Geleneksel yöntemle 10 Hz tarama hızında görüntüleme (Conventional_10Hz.mpg)
5. Projede önerilen yöntemle 0.5 Hz tarama hızında görüntüleme (Method_0.5Hz.mpg)
6. Projede önerilen yöntemle 5 Hz tarama hızında görüntüleme (Method_5Hz.mpg)
7. Projede önerilen yöntemle 10 Hz tarama hızında görüntüleme (Method_10Hz.mpg)
8. Kazanç kontrol ve piezo uyarıcı sinyallerinin tarama sırasındaki osiloskop görüntüleri (Gain_control_and_Tapping_piezo.mpg)

**TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje No: 110T732
Proje Başlığı: Atomik Kuvvet Mikroskobu Uygulamaları için Yüksek Hızlı, Aktüatörsüz, ve Dinamik Görüntüleme Metodunun Geliştirilmesi
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Müjdat BALANTEKİN
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Urla, İzmir
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: Tübitak, Ankara
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01/04/2011 - 01/07/2013
Öz (en çok 70 kelime) <p>Bu projede, Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM) uygulamaları için yüksek hızlı, aktüatörsüz, ve dinamik bir görüntüleme metodu geliştirilmiştir. Sıradan bir AKM probuyla bile görüntüleme hızının geleneksel dinamik-AKM görüntüleme yöntemine kıyasla 100 kat civarında arttırılabilir. Belirli koşullar altında, rezonans frekansı 600 kHz olan bir prob ile 100×100 piksellik görüntünün 24 çerçeve/sn hızında alınabileceği teorik olarak gösterilmiştir. Deney sonuçları görüntüleme hızının geleneksel görüntüleme yöntemine göre önemli ölçüde arttırılabileceğini göstermiştir.</p>
Anahtar Kelimeler: Atomik Kuvvet Mikroskobu, Yüksek Hızlı Dinamik-AKM Görüntülemesi, Q-kontrollü Prob Titreşim Modu
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/> <small>Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.</small>
Projeden Yapılan Yayınlar: <ol style="list-style-type: none">1. Patent Başvurusu (Araştırma aşamasında), M. Balantekin, TPE, 2012/09788, "Taramalı Prob Mikroskopları için İşletim Metodu"2. Makale, M. Balantekin, (Ultramicroscopy dergisine gönderildi), "High-speed dynamic atomic force microscopy by using a Q-controlled cantilever eigenmode as an actuator"3. Makale, M. Balantekin, S. Satır, D. Torello, ve F. L. Değertekin, (Ultramicroscopy dergisine gönderildi), "Experiments of high-speed tapping-mode atomic force microscopy using a Q-controlled regular cantilever acting as the actuator"4. Konferans Bildirisi, M. Balantekin, NSTI-Nanotech, Washington, D.C., "High-speed

imaging in noncontact atomic force microscopy”, Vol. 1, pp. 1-4 (2013).

5. Konferans (Sözlü sunum yapıldı), M. Balantekin, 15th International Scanning Probe Microscopy Conference, Dijon, France, “High-speed operating method for tapping-mode atomic force microscopes with regular cantilevers”, (2013).

6. Konferans (Sözlü sunum yapılacak), M. Balantekin, IVC-19/ICSS-15 & ICN+T 2013, Paris, France, “High-speed imaging in tapping-mode atomic force microscopy”, (2013).