

Alçak Sıcaklıklarda (1.5-300K) Çalışan Yüksek Çözünürlüklü Manyetik Kuvvet Mikroskobu Geliştirilmesi

Program Kodu: Uluslararası CNR

Proje No: 111T802

Proje Yürütücüsü: Prof. Dr. Ahmet Oral

<u>Bursiyer(ler):</u> Yiğit Uysallı Ercan Karagöz

> Şubat 2016 ANKARA



ÖZET

Manyetik Kuvvet Mikroskopisi (MKM) 10nm'ye kadar manyetik çözünürlük verebilen bir manyetik görüntüleme yöntemidir. Her yıl kapasitesi artan manyetik harddiskler gelistirildikce bunların daha yüksek cözünürlüklü görüntüleme yöntemleriyle karakterize edilmesi ihtiyacı giderek artan bir şekilde oluşmaktadır. Öte yandan manyetik nanoyapıların kendi başlarına, üstüniletken ya da variiletkenlerle olan etkilesimleri de veni ilginc bilimsel etkiler ve olavlar ortava çıkarmaktadır. Bu projede bu bilimsel ve teknolojik problemlere bir alternatif sunabilmek için Alçak Sıcaklıklarda (1.5-300K) çalışan, daha yüksek kuvvet hassasiyetine sahip olan bir MKM geliştirilmiş ve daha sivri ve kararlı manyetik iğneler imal edilerek daha yüksek manyetik çözünürlük, 6-8nm, elde edilmiştir. Bu projede CNR İtalya grubu ile sıkı bir işbirliği ile çalışmalar yürütülmüştür. MKM'nun geliştirilmesi kısmı Sabancı Üniversitesinde, MKM uçlarının FIB vb. vöntemlerle ivilestirilmesi ve manyetik karakterziasyon numunelerinin hazırlanması kısmı ise daha ağırlıklı olarak CNR'de yapılmıştır.

MKM manyetik bir malzeme ile kaplı sivri iğne ile manyetik yüzey arasındaki kuvveti ölçerek çalışan MKM'unda kontrastı sağlayan manyetik kuvvet uzaklığın küpü ve manyetik malzeme ve iğnenin manyetik hacmi ile orantılı olarak MKM'nun performansını artırmak için halen kullanmakta azalmaktadır. olduğumuz fiber interferometre fiber optik tabanlı bir Fabry-Perot interferometresi ile değiştirilerek kullanılmıştır. MKM'unda kuvvet sivri manyetik iğnenin monte edildiği sapmasının ölçülerek ve Hooke kanunu kullanılarak yayın belirlenmektedir. Dolayısıyla kuvvet hassasiyetini artırmak için mesafe ölçen sistemin hassasiyetinin artırılması gereklidir. Fabry-Perot interferometresi yapabilmek için fiberin ucu altın ya da çok katlı dielektrik ayna ile kaplanarak fiber ucundan gelen yansıma artırılmış, iğne-fiber ucu arasında çoklu yansımaların oluşması sayesinde mesafe ölçme, dolayısıyla kuvvet ölçme hassasiyetinin geniş sıcaklık aralığında 3-10 kat artırılmıştır. Mikroskobun kuvvet ölçme performansı ölçülerek iyileştirilmiş ve bunun görüntülemeye olan etkisi yüksek yoğunluklu manyetik harddisk ve manyetik nanoyapılar görüntülenerek gösterilmiştir. Bu proje Tübitak tarafından desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler:

Manyetik Kuvvet Mikroskopisi, interferometre, Fabry-Perot, Manyetik görüntüleme, Manyetik nanoyapılar



ABSTRACT

Magnetic Force Microscopy (MFM) is a magnetic imaging technique which provides magnetic resolution down to 10 nm. As the capacity of magnetic hard disks is increasing each year, the request towards the characterization of those with analytical imaging methods is becoming more important. Besides, the self interactions of magnetic nanostructures and their interactions with superconductors and semiconductors lead to very interesting scientific effects and phenomena. In this project we propose to develop an MFM with high high magnetic resolution, 6-8 nm. The microscope will operate at low temperatures (1.5-300 K) We plan to use sharper and more stable magnetic tips. MFM measures the magnetic force between the sharp tip coated with a magnetic material and the magnetic surface. Therfore the force which provides the contrast in the microscope is proportionally decreasing with the cube of the distance and the magnetic material and the magnetic volume of the tip. In order to enhance the performance of the MFM, the interferometer used in the microscope will be replaced with a fiber optic based Fabry-Perot interferometer. To be able to achieve 6-8nm resolution, we aim to improve the noise performance of the MFM by a factor of 3-10.

Keywords:

Magnetic Force Microscopy, interferometer, Fabry-Perot, Magnetic imaging, Magnetic nanostructures



İÇİNDEKİLER

- 1. Giriş (Sayfa 6)
 - 1.1. Manyetik Kuvvet Mikroskobu(DS-MKM) Temel Testleri (Sayfa 6)
 - 1.2. Stick-Slip Yaklaşma Mekanizması (Sayfa 12)
 - 1.2.1. Fiber Fabry-Perot Interferometre Sinyali (Sayfa 14)
- 2. FFPI ile DS-AKM/MKM'ı soğutma(Sayfa 17)
- 2.1. Gürültü Ölçümleri (Sayfa 20)
- 3. Deneysel Sonuçlar (Sayfa 21)

3.1. Fiber Fabry-Perot Interferometreli AKM ile 50-300K arasında tapping mode ile Görüntüleme (Sayfa 22)

3.2. Fiberi Hareket Ettiren Slider Sisteminin Düşük Sıcaklılarda Performansını Daha İyileştirmek İçin Yeni Bir Tasarımın Yapılması Ve Gerçekleştirilmesi (Sayfa 23)

3.3. Çeşitli Tarama Sonuçları (Sayfa 25)

- 4. Performans lyileştirme (Sayfa 26)
 - 4.1. Fiber Fabry-Pérot Interferometre (Sayfa 28)
 - 4.2. Fabry-Perot Interferometresinin Deneysel sonuçları (Sayfa 28)
 - 4.3. Fabry-Pérot Interferometresinin Gürültü Ölçümleri (Sayfa 32)

5. Fabry-Perot İnterferometreli DS-AKM/MKM Sistemin AKM Çalıştırılması (Sayfa 35)

6. Fabry-Perot İnterferometreli DS-AKM/MKM Sistemin MKM Çalıştırılması (Sayfa 36)

7. Sonuçlar (Sayfa 38)

7.1. Proje Süresince Proje Kapsamında Yapılan veya hazırlanan Yayımlar ve Toplantılarda Sunulan Bildiriler (Sayfa 39)

TABLO LISTESI

Tablo 1: Şekil 15'te kullanılan FFPI sinyali parametreleri (Sayfa 13)

Tablo 2: Michelson tipi ve Fabry-Perot tipi interferometrelerin parametrelerinin kıyaslanması (Sayfa 20)

Tablo 3: Interferometrede 2x2 Fibre optic coupler ve fiber optic circulator karşılaştırması (Sayfa 27)

Tablo 4: Michelson ve circulator kullanan Fabry-Perot interferometrelerinin karşılaştırılması (Sayfa 32)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Deneylerde kullandığımız NanoManyetik şirketi tarafından imal edilen Düşük Sıcaklıklarda çalışan Atomik Kuvvet /Manyetik Kuvvet Mikroskobu(DS-AKM/MKM) (Sayfa 6)

Şekil 2. DS-AKM/MKM Kontrol Elektroniğinin fotoğrafı (Sayfa 6)

Şekil 3. DS-AKM/MKM ile Kontrol Elektroniğinin bağlantısı (Sayfa 6)

Şekil 4. DS-AKM/MKM ile Kontrol Elektroniğinin bağlantısı ve çalıştırılma prensibi. (Sayfa 7)

Şekil 5. DS-AKM/MKM ile AKM modu'nda oda sıcaklığında elde edilen bir bluray görüntüsü: Topografi ve faz (Sayfa 8)

Şekil 6. İnterferometrede kullanılan lazer diyodun ışıma spektrumu (Sayfa 9)

Şekil 7. AKM yayının arkası ile fiberin ucu arasında Fabry-Perot İnterferometresi oluşturabilmek için fiberin ucuna düşünülen çok tabakalı dielektrik ayna (Sayfa 9) Şekil 8. Fiberin ucuna direk büyütülen çok katmanlı dielektrik aynanın yansıma spektrumu ölçümü (Sayfa 10)

Şekil 9.Taramapiezosu ucuna monte edilecek olan fiber motor tasarımı(Sayfa 11) Şekil 10. Tarama piezosu ucuna monte edilecek olan fiber motor tasarımı: Vyatağı, ferrül ve yay (Sayfa 11)

Şekil 11.Fiber motoru hareket ettirmek için Tarama piezosuna uygulanması gereken voltaj darbeleri (Sayfa 12)

Şekil 12: V şekilli holder'a monte edilen tarayıcı piezo (Sayfa 13)



Şekil 13: Tarayıcı piezoya gönderilen 200V slider pulse (a) signal pulse (b) repetitive pulses (Sayfa 13)

Şekil 14: Fiberin kantilever'e yaklaşması.Birkaç mm'den ~4 µm'a (Sayfa 14)

Şekil 15: (a) Tipik bir fiber Fabry-Perot interferometre sinyali (b) Fiber pozisyonunun sinyalin türevi OP: operasyon noktası (Sayfa 15)

Şekil 16: Kavite aralığı-girişim sinyali (Sayfa 16)

Şekil 17: Eğim-Kavite Boşluğu grafiği, T=300K (Sayfa 17)

Şekil 18: Eğim-sıcaklık grafiği (Sayfa 18)

Şekil 19: Görünürlük-sıcaklık grafiği (Sayfa 18)

Şekil 20: FFPI sinyali (a) 300K, (b) 77K ve (c) 4K (Sayfa 19)

Şekil 21: İlk imal edilen FFPI tabanlı DS-AKM/MKM'nin Spektral gürültü yoğunluğu (T=300K) (Sayfa 21)

Şekil 22: 6µm Kalibrasyon grating AFM görüntüleri (300K) (a) Topografi, (b) Amplitude ve (c) Faz (Sayfa 22)

Şekil 23. Bluray kalibrasyon numunesi ile (a) 300K, (b) 77K ve (c) 50K de alınan tapping mode AKM görüntüleri. (Sayfa 23)

Şekil 24. Yeni tasarlanıp çalıştırılan fiber kaydırak mekanizması (Sayfa 24)

Şekil 25. Fiber kaydırak mekanizmasını hareket ettirmek için Tarayıcı piezoya gönderilen 200V voltaj darbeleri (Sayfa 25)

Şekil 26. 300K'de 2µm periyotlu Kalibrasyon grating AKM görüntüleri (a) Topografi, (b) Amplitude ve (c) Faz (Sayfa 25)

Şekil 27. 4K'de 2µm periyotlu Kalibrasyon grating AKM görüntüleri (a) Topografi, (b) Amplitude ve (c) Faz (Sayfa 26)

Şekil 28. Tapping mode AKM ile Alınmış (a) Nb2O5 ince film ve (b) İTO ince film görüntüleri, 300K (Sayfa 26)

Şekil 29: 3 kollu 1310 nm circulator kullanan fiber optik Fabry-Perot interferometre (Sayfa 27)

Şekil 30. Michelson ve Fabry-Pérot interferometre karşılaştırması, 1,310 nm dalgaboyu için (Sayfa 28)

Şekil 31: Fiber Fabry-Perot interferometre deseninin lazer gücüne göre değişimi (Sayfa 29)

Şekil 32: Fotodiyot üzerindeki Ortalama optik gücün lazer gücüne göre değişimi (Sayfa 30)

Şekil 33. Fibre Fabry-Perot interferometre eğiminin lazer gücüne göre değişimi (Sayfa 30)

Şekil 34: 5K de Fiber Fabry-Perot interferometre deseninin lazer gücüne göre değişimi (Sayfa 31)

Şekil 35. 5K de Fibre Fabry-Perot interferometre eğiminin lazer gücüne göre değişimi (Sayfa 31)

Şekil 36. 300K de ölçülen Fibre Fabry-Perot interferometre sisteminin gürültü spektrumu. Shot noise değeri 0.84 fm/√Hz olarak hesaplanmıştır. İnteferometre hassasiyeti ~120 mV/Å. (Sayfa 33)

Şekil 37. 77K de ölçülen Fibre Fabry-Perot interferometre sisteminin gürültü spektrumu. Shot noise değeri 0.66 fm/ \sqrt{Hz} olarak hesaplanmıştır. İnteferometre hassasiyeti ~120 mV/Å. (Sayfa 34)

Şekil 38. 4.5K de ölçülen Fibre Fabry-Perot interferometre sisteminin gürültü spektrumu. Shot noise değeri 0.16 fm/ \sqrt{Hz} olarak hesaplanmıştır. İnteferometre hassasiyeti ~120 mV/Å. (Sayfa 34)

Şekil 39 . AKM modunda 300K de alınan tapping mode görüntüleri (a) Topografi, (b) Amplitude (Feedback) (c) Faz. 20 µm x 20 µm (Sayfa 35)

Şekil 40 . AKM modunda 4K de alınan tapping mode görüntüleri (a) Topografi, (b) Amplitude (Feedback) (Sayfa 36)

Şekil 41. 80 GB/Platter harddisk numunenin MKM modunda alınan görüntüleri, sıcaklık 15K (Sayfa 37)

Şekil 42. BSCCO numunede Abrikosov girdap kristalinin 4K de elde edilen MKM görüntüsü. (Sayfa 38)



1. Giriş

Bu projede ultra düşük gürültülü bir düşük sıcaklık atomik kuvvet / manyetik kuvvet (DS-AKM/MKM) mikroskobu sistemi geliştirilmiştir. Yeni tasarlanan mikroskop ile yayın sapması yüksek 'finesse'li bir fiber optik Fabry-Perot interferometre kullanılarak ölçülür hale getirilmiştir. Fabry-Perot interferometresini yüksek performansla çalıştırabilmek için ise mikroskop fiberi yaya göre hareket ettirebilecek bir şekilde tasarlanarak yeniden imal edilmiştir. Fiber yay'a bir kaç mm uzaklıktan yaklaşık 1µm kadar yakına kadar getirilebilmektedir. DS-AKM sistemi ile 1.5-300K arası çalışma AKM ve MKM kiplerinde başarılmış ve dünyada bir rekor değer olan ~1fm/√Hz gürültü seviyesi elde edilmiştir.

1.1. Manyetik Kuvvet Mikroskobu(DS-MKM) Temel Testleri

Bu proje başında Şekil 1. de fotoğrafı verilen Düşük Sıcaklıklarda çalışan bir Manyetik Kuvvet Mikroskobu(DS-MKM) NanoManyetik şirketi tarafından tarafımıza teslim edilmiş ve Atomik Kuvvet Mikroskobu(AKM) olarak başarı ile denenmiştir. Şekil 2. de bu mikroskobun kontrol elektroniğinin fotoğrafı gösterilmektedir. Şekil 3 ve 4 de elektroniğin mikroskoba nasıl bağlanarak çalıştırıldığı gösterilmektedir. Şekil 5'de bu mikroskop kullanılarak AKM modunda oda sıcaklığında elde edilen bir bluray görüntüsü verilmiştir.





Şekil 1. Deneylerde kullandığımız NanoManyetik şirketi tarafından imal edilen Düşük Sıcaklıklarda çalışan bir Atomik Kuvvet /Manyetik Kuvvet Mikroskobu(DS-AKM/MKM).





Şekil 2. DS-AKM/MKM Kontrol Elektroniğinin fotoğrafı



Şekil 3. DS-AKM/MKM ile Kontrol Elektroniğinin bağlantısı



Şekil 4. DS-AKM/MKM ile Kontrol Elektroniğinin bağlantısı ve çalıştırılma prensibi.





Şekil 5. DS-AKM/MKM ile AKM modu'nda oda sıcaklığında elde edilen bir bluray görüntüsü: Topografi ve faz

İnterferometrede kullanılan lazer diyodun ışıma spektrumu ölçülmüş ve Şekil 6'da gösterilmiştir.





Şekil 6. İnterferometrede kullanılan lazer diyodun ışıma spektrumu

Bu lazer spektrumuna uygun olarak, AKM yayının arkası ile fiberin ucu arasında Fabry-Perot İnterferometresi oluşturabilmek için Şekil 7'de gösterildiği gibi bir çok tabakalı dielektrik ayna düşünülerek 'cleave' edilmiş fiberlerin ucuna kaplanma üzere ısmarlanmıştır.



Şekil 7. AKM yayının arkası ile fiberin ucu arasında Fabry-Perot İnterferometresi oluşturabilmek için fiberin ucuna düşünülen çok tabakalı dielektrik ayna



Fiberin ucuna direk büyütülecek olan çok katmanlı dielektrik ayna imal ettirilerek denenmiştir. Şekil 8'de imal ettirilen aynanın yansıma spektrumu ölçümü gösterilmektedir.



Şekil 8. Fiberin ucuna direk büyütülen çok katmanlı dielektrik aynanın yansıma spektrumu ölçümü

Fiberli Fabry-Perot interferometresinin iyi çalışabilmesi için fiber-yay mesafesinin çok yakın olması gerekmektedir. Bu mesafeyi ayarlayabilmek için fiber tutucu ucuna monte edilecek bir fiber motoru için yeni bir tasarım düşünülmüştür. Şekil 9 ve 10'da bu fiber motor tasarım gösterilmektedir. Bu tasarımda V-yatağına sıkıştırılacak olan ferrül tarama piezosuna voltaj darbeleri verilerek stick-slip harektei ile hareket ettirilmeye çalışılacaktır. Şekil 11'de tarama piezosuna uygulanması gereken voltaj darbeleri gösterilmektedir.



Şekil 9. Tarama piezosu ucuna monte edilecek olan fiber motor tasarımı



V-shaped metal holder







Şekil 11.Fiber motoru hareket ettirmek için Tarama piezosuna uygulanması gereken voltaj darbeleri

1.2. Stick-Slip Yaklaşma Mekanizması

Proje kapsamında geliştirilmekte olan Düşük Sıcaklık-Atomik Kuvvet / Manyetik Kuvvet Mikroskobu (DS-AKM/MKM)'da örneği tarama ucuna yaklaştırmak için Stick-Slip yaklaşma mekanizması kullanılmıştır. Şekil 12'de V şekilli holder'a monte edilen tarayıcı piezo görülebilir. Bu mekanizma ile V şekilli metal holder ferrül tüpe kaydırılarak yaklaştırılmıştır. Bu amaç için kontrol elektroniğinin slider kartı aracılığıyla 200V slider pulse tarayıcı piezoya uygulanmıştır. Tek sinyal ve takip eden slider pulse lar Şekil13'deki grafiklerde görülmektedir. Stick-slip yaklaşma mekanizması kullanılarak fiberi kantilever'e yaklaştırabildik. Kavite aralığı bu yolla ~1µm'ye azalmış ve Fabry-Perot interferometre sinyali elde edilmiştir.





Şekil 12: V şekilli holder'a monte edilen tarayıcı piezo



Şekil 13: Tarayıcı piezoya gönderilen 200V slider pulse (a) signal pulse (b) repetitive pulses

Şekil 14'te kantilever'e yaklaştırılan fiber görülmektedir. V şekilli holder fiber kantilever'e çok yaklaştığında doğrusal hareket sağlamaktadır, önceden ayarlanan pozisyon korunmaktadır. ±z yönlerinde verilen tekrarlayan hareketler ile aynı girişim sinyali elde edilebilmektedir. Böylece bu mekanizmanın güvenilirliği kanıtlanmış olur.





(a) birkaç mm





(c) ~50 µm



(d) ~4 µm

Şekil 14: Fiberin kantilever'e yaklaşması. Birkaç mm'den ~4 µm'a kadar

1.2.1. Fiber Fabry-Perot İnterferometre Sinyali

Tipik bir FFPI sinyali (foto diyot sinyali) ve fiberin pozisyonu ile ilgili olan türevi (dW/dx) Şekil 4'te görülebilir. Sinyalle ilgili parametreler Tablo 1'te verilmiştir. Biz tipik olarak oda sıcaklığında ~25 mV/Å slope elde ettik, bu değer Michelson fiber interferometresi eğim değerine göre ~8x kat daha iyidir.

Slope	24.41	mV/Å
Cavity Gap	~3	μm
Reflectivity	47	%
Laser Power	2.68	mW
Visibility	0.835	birimsiz
Finesse	5.09	birimsiz

Tablo 1: Şekil 15'te kullanılan FFPI sinyali parametreleri





Şekil 15: (a) Tipik bir fiber Fabry-Perot interferometre sinyali (b) Fiber pozisyonunun sinyalin türevi OP: operasyon noktası

Slider mekanizması ile kavite aralığı azaldığında girişim deseni kademe kademe değişir ve desenin slope değeri artar (Şekil 16). Aralık 50 µm iken slope 17.50 mV/Å'dir. Aralık 5 µm'ye indiğinde slope 21.74 mV/Å'a artmaktadır (Şekil 17).







(b) Kavite aralığı: ~20µm, Eğim: 20.47 mV/Å



(c) Kavite aralığı: ~5µm, Eğim: 21.74 mV/Å

Şekil 16: Kavite aralığı-girişim sinyali





Şekil 17: Eğim-Kavite Boşluğu grafiği, T=300K

2. FFPI ile DS-AKM/MKM'ı soğutma

Mikroskobu soğutma sırasında pek kararlı bir davranış gözlemlenmemiştir. Sık sık fiber kaydırıcı değişik sıcaklıklarda durmuştur. Mikroskobu soğuttuğumuzda Şekil 7'de görüldüğü üzere bazı sinyalleri kaybederiz. Eğim sıcaklık 300K iken ~25 mV/Å'tan, 4K'de ~12 mV/Å'a kadar azalmaktadır. Bu bizim için sıradan interferometrelerde termal drifitlerden dolayı oluşan benzer durumlardan dolayı sürpriz olmamıştır. Sinyalin görünürlüğü(visibility) ise 0.9'ten 0.55'e azalmaktadır (Şekil 19). Sinyalin görünürlüğü şu formülden çıkar.

 $V = \frac{i_{max} - i_{min}}{i_{max} + i_{min}}$





Şekil 18: Eğim-sıcaklık grafiği





Soğutma prosesi boyunca interferometre sinyalleri değişimi Şekil 20'da görülebilir.



Şekil 20: FFPI sinyali (a) 300K, (b) 77K ve (c) 4K



Tablo 2'de standart Michelson interferometresi ile fiber Fabry-Perot Interferometresi kıyaslaması verilmiştir. Sinyali etkileyen tüm parametreler kıyaslanmıştır.

Tablo 2: Michelson tipi ve Fabry-Perot tipi interferometrelerin parametrelerinin kıyaslanması

1		2	Michelson Type	3	Fabry-Perot Type
4	Reflectivity, %	5	~3	6	~47
7	Cavity Gap, µm	8	30	9	~4
10	Spot Size, µm	11	19	12	10
13	Slope at 300K, mV/Å	14	~3.2	15	~25
16	Slope at 4K, mV/Å	17	~1.8	18	~12

2.1. Gürültü Ölçümleri

İnterferometrenin spektral gürültü yoğunluğu değerleri 300 K için hesaplanmış ve deneysel olarak ölçülmüştür (Şekil 21). Normal Michaelson tipi İnterferometre kullanılarak gürültü seviyesi 25 fm/ \sqrt{Hz} 'e, Shot noise değeri de ~8 fm/ \sqrt{Hz} idi. Bu proje kapsamında ilk geliştirdiğimiz Fiber Fabry Perot İnterferometresi ile gürültü alt sınırı ~8 fm/ \sqrt{Hz} olarak ölçülmüştür. Limitleyici shot noise değeri ise ~2 fm/ \sqrt{Hz} olarak hesaplanmıştır. Hassasiyetteki bu ~3 katlık geliştirme FFPI kullanılması ile sağlanabilmiştir. Düşük sıcaklık gürültü ölçümleri optimizasyonu devam etmektedir.





Şekil 21: İlk imal edilen FFPI tabanlı DS-AKM/MKM'nin Spektral gürültü yoğunluğu (T=300K)

3. Deneysel Sonuçlar

Proje kapsamında test deneyleri için öncelikle kalibrasyon grating örneği 300K sıcaklıkta taranmıştır. Şekil 22'de görüntüler görülebilir. Oda sıcaklığı görüntüleri teşvik edicidir. 1-5 N/m nominal yay sabiti ve yaklaşık 75kHz rezonans frekansı değerlerinde PPP-FMR kantielever'ler görüntüleme için kullanılmıştır. Çok küçük dither uyarımı ile kantilever yüksek sinyallerde titreşmektedir. Bu sebeple biz de daha yüksek voltaj değerleri kullandık. Hatta bu yüksek voltaj değerleri düşük osilasyon genliği sağlamıştır. Bu deneyler için 20nm osilasyon genliği elde ettik.





Şekil 22: 6µm Kalibrasyon grating AFM görüntüleri (300K) (a) Topografi, (b) Amplitude ve (c) Faz

3.1. Fiber Fabry-Perot İnterferometreli AKM ile 50-300K arasında tapping mode ile Görüntüleme

Geliştirdiğimiz DS-AKM/MKM sistemi 300K'den itibaren soğutularak bluray kalibrasyon numunesi ile görüntüler alınarak denenmeye çalışılmıştır. Deneylerde kapalı devre çalışan bir Helyum kriyostatı kullanımıştır. Şekil 23'de



gösterildiği gibi sistem 300K, 77K ve 50K de başarılı olarak çalıştırılabilmiştir. Ancak 50K civarından daha düşük sıcaklıklara inilince fiberi ileri-geri hareket ettiren piezo slider mekanizması güvenilir bir şekilde çalışmamaya başlamıştır.













3.2. Fiberi Hareket Ettiren Slider Sisteminin Düşük Sıcaklılarda Performansını Daha İyileştirmek İçin Yeni Bir Tasarımın Yapılması Ve Gerçekleştirilmesi

Proje kapsamında düşük sıcaklıklarda iyi çalışmayan fiber slider için yeni bir Stick-Slip yaklaşma mekanizması tasarlanmıştır. Bu tasarımda temel olarak fiber ferrülünün ağırlığı artırılmış ve sorun çıkartan yüzeyler tespit edilerek daha iyi işlenmeleri sağlanmıştır. Ancak bu sorunların tespiti, tasarım, imalat ve testler



yaklaşık olarak 4-5 ay vaktimizi almıştır. Şekil 24'de yeni kaydırak sistemi, Vyataklı ferrül mekanizması ve bunların monte edildiği tarayıcı piezo tüp görülebilir. Bu mekanizma ile piezoelektrik tüpe üstel voltaj uygulanarak ferrül Vyatak içinde kaydırılarak hareket ettirilmesi başarılmıştır. Bu amaç için kontrol elektroniğinin slider kartı aracılığıyla 200V slider pulse tarayıcı piezoya uygulanmıştır. Tek sinyal ve takip eden slider pulse lar Şekil25'deki grafiklerde görülmektedir. Stick-slip yaklaşma mekanizması kullanılarak fiberi kantilever'e yaklaştırabildik. Kavite aralığı bu yolla ~1µm'ye azalmış ve Fabry-Perot interferometre sinyali elde edilmiştir.





Şekil 24. Yeni tasarlanıp çalıştırılan fiber kaydırak mekanizması





Şekil 25. Fiber kaydırak mekanizmasını hareket ettirmek için Tarayıcı piezoya gönderilen 200V voltaj darbeleri

3.3. Çeşitli Tarama Sonuçları

Fiber kaydırak iyileştirildikten sonra denemeler yapılarak 4K-300K aralığında güvenilir şekilde çalıştırılması sağlanmıştır. Şekil 26 ve Şekil 27'de 300K ve 4K'de tapping mode ile alınan görüntüler verilmektedir. Ayrıca mikroskobun yatay çözünürlüğünü test etmek için Nb₂O₅ ve İTO ince filmler de Şekil 28'de gösterildiği gibi 300K'de başarılı bir şekilde görüntülenmiştir.



(b) Şekil 26. 300K'de 2µm periyotlu Kalibrasyon grating AKM görüntüleri(a) Topografi, (b) Amplitude ve (c) Faz



Şekil 27. 4K'de 2µm periyotlu Kalibrasyon grating AKM görüntüleri (a) Topografi, (b) Amplitude ve (c) Faz



Şekil 28. Tapping mode AKM ile Alınmış (a) Nb2O5 ince film ve (b) İTO ince film görüntüleri, 300K

4. Performans İyileştirme

İnterferometremizi daha da iyileştirmek için alternatifler düşündük ve Shot Noise sınırını düşürerek bunu halledebileceğimizi gördük. Bunun için inteferometrede kullandığımız 2x2 fiber işleyiciyi Şekil 29'da gösterildiği gibi 3 kollu fiber optik circulator ile değiştirmeye karar verdik.



Şekil 29: 3 kollu 1310 nm circulator kullanan fiber optik Fabry-Perot interferometre

Circulator tabanlı sistem 2x2 fiber çoklayıcıya göre 4 kat daha fazla gücü fotodiyoda yönlendirmektedir. Bu sayede teorik olarak Shot Noise değeri yarıya düşebilir. Tablo 3'de 3 mW lazer power. Gücü için yaptığımız ölçümler ve karşılaştırmas verilmiştir. Elde ettiğimiz sinyal eğiminin değer artışı x4 yerine x3 olmuştur.

Tablo 3: Interferometrede 2x2 Fibre optic coupler ve fiber optic circulator karşılaştırması

	Power in the Fibre (mW)	Typical Average Power at Signal PD (μW)	Slope (mV/Å)
2x2, 50% Coupler	1.5	200	30
Circulator	3.0	800	120



4.1. Fiber Fabry-Pérot Interferometre

Fabry-Perot interferometresinde fiber yaydan uzakken fiber uçtan yansıyan ışık yaklaşık olarak % 40-50 civarındadır. Fiber yaya yaklaşınca fiberin ucundaki ayna ve yay arasında çoklu yansımalar nedeniyle interferans deseni şekil 30'da gösterildiği üzere sinüs'den periyodik ama çok daha yüksek eğimli bir fonksiyona dönüşür.

Sinya fotodedektöründe oluşan fotoakım

$$i = i_0 \left[1 - V F\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \right]$$

Şeklinde verilmektedir. Bu denklemde V, d ve λ 'visibility', yay-fiber mesafesi ve dalga boyudur.



Şekil 30. Michelson ve Fabry-Pérot interferometre karşılaştırması, 1,310 nm dalgaboyu için

4.2. Fabry-Perot İnterferometresinin Deneysel sonuçları

Fiber Fabry-Pérot interferometre sisteminin girişim deseni optimal yay-fiber mesafesi için 300K sıcaklığında Şekil 31'de gösterilmiştir. Fotodiyot üzerindeki



gücün lazer gücüne göre değişimi de 300K için Şekil 32'de verilmektedir. Şekil 33'de inteferometre eğiminin/hassasiyetinin lazer gücüne göre değişiminin ölçülmüş değerleri 300K için verilmektedir. Fiber Fabry-Pérot interferometre sisteminin girişim deseni optimal yay-fiber mesafesi için 5K sıcaklığında Şekil 34'de gösterilmiştir. Şekil 35'de ise inteferometre eğiminin/hassasiyetinin lazer gücüne göre değişiminin ölçülmüş değerleri 5K için verilmektedir.



Şekil 31: Fiber Fabry-Perot interferometre deseninin lazer gücüne göre değişimi





Şekil 32: Fotodiyot üzerindeki Ortalama optik gücün lazer gücüne göre değişimi



Şekil 33. Fibre Fabry-Perot interferometre eğiminin lazer gücüne göre değişimi





Şekil 34: 5K de Fiber Fabry-Perot interferometre deseninin lazer gücüne göre değişimi



Şekil 35. 5K de Fibre Fabry-Perot interferometre eğiminin lazer gücüne göre değişimi



2x2 Fiber optik çoklayıcı kullanan Fiber Michelson ve circulator kullanan Fiber Fabry-Perot interferometrelerinin karşılaştırılması Tablo 4'de verilmektedir. Fabry-Perot sistemi Michelson interferometresine göre yaklaşık olarak 30 kat daha yüksek bir eğim vermektedir.

Tablo 4 : Michelson ve circulator kullanan Fabry-Perot interferometrelerinin
karşılaştırılması

	Power in the Fibre	Slope	Visibility	Finesse
	(mW)	(mV/Å)		
2x2 Fiber optik çoklayıcı kullanan Michelson interferometresi	1.5	4	0.3	1.0
Circulator kullanan Fabry- Perot İnetrferometresi	3.0	120	0.9	6.5

4.3. Fabry-Pérot Interferometresinin Gürültü Ölçümleri

Sistemin 300K de ölçülen gürültüsü Şekil 36'de gösterildiği gibi ~1.7 fm/√Hz olarak ölçülmüştür. Shot noise değeri 0.84 fm/√Hz olarak hesaplanmıştır. Ölçüm Rohde&Schwarz FSV spektrum analizör ile 15 N/m PPP-FMR yay ile ölçülmüştür. Lazer gücü olarak 3 mW kullanılmış ve 120 mV/Å eğim elde edilmiştir.

77 K sıcaklığında gürültü Şekil 37'de gösterildiği gibi 1fm/√Hz olarak ölçülmüştür. Shot noise değeri 0.66 fm/√Hz olarak hesaplanmıştır. Ölçüm Rohde&Schwarz FSV spektrum analizör ile 25 N/m PPP-MFMR yay ile ölçülmüştür. Lazer gücü olarak 3 mW kullanılmış ve 120 mV/Å eğim elde edilmiştir.

4.5K sıcaklığında gürültü Şekil 38'de gösterildiği gibi 1 fm/√Hz olarak ölçülmüştür. Shot noise değeri 0.16fm/√Hz olarak hesaplanmıştır. Ölçüm Rohde&Schwarz FSV spektrum analizör ile 25 N/m PPP-MFMR yay ile



ölçülmüştür. Lazer gücü olarak 3 mW kullanılmış ve 120 mV/Å eğim elde edilmiştir.



Şekil 36. 300K de ölçülen Fibre Fabry-Perot interferometre sisteminin gürültü spektrumu. Shot noise değeri 0.84 fm/√Hz olarak hesaplanmıştır. İnteferometre hassasiyeti ~120 mV/Å.





Şekil 37. 77K de ölçülen Fibre Fabry-Perot interferometre sisteminin gürültü spektrumu. Shot noise değeri 0.66 fm/√Hz olarak hesaplanmıştır. İnteferometre hassasiyeti ~120 mV/Å.



Şekil 38. 4.5K de ölçülen Fibre Fabry-Perot interferometre sisteminin gürültü spektrumu. Shot noise değeri 0.16 fm/√Hz olarak hesaplanmıştır. İnteferometre hassasiyeti ~120 mV/Å.



5. Fabry-Perot İnterferometreli DS-AKM/MKM Sistemin AKM olarak Çalıştırılması

Sistemin son halinin testleri önce AKM olarak 300K ve 4K de kalibrasyon numunesi ile yapıldı. Şekil 39 ve Şekil 40'da 300K ve 4K de AKM modunda alınan görüntüler verilmiştir. Deneyler tapping mode'da 8nm titreşim genliği kullanarak icra edilmiştir.



Şekil 39 . AKM modunda 300K de alınan tapping mode görüntüleri (a) Topografi, (b) Amplitude (Feedback) (c) Faz. 20 μm x 20 μm





Şekil 40 . AKM modunda 4K de alınan tapping mode görüntüleri (a) Topografi, (b) Amplitude (Feedback)

15 µm x 15 µm

6. Fabry-Perot İnterferometreli DS-AKM/MKM Sistemin MKM olarak Çalıştırılması

Sistemin son halinin testleri daha sonra MKM olarak 300K, 15K ve 4K de manyetik hard disk ve BSCCO üstünletkenindeki Abrikosov girdap örgüsünün gözlenmesi ile yapılmıştır. Şekil 41de 15K de alınan 80 GB/Platter harddisk numunenin MKM modunda alınan görüntüleri verilmiştir. Deneyler 90nm ile lift mode ile tapping mode'da kullanarak icra edilmiştir.



Şekil 41. 80 GB/Platter harddisk numunenin MKM modunda alınan görüntüleri, sıcaklık 15K

Sistemin en zor testi BSCCO(2212) üstünletkenindeki Abrikosov girdap örgüsünün gözlenmesi ile yapılmıştır. BSCCO numune +14Gauss alan altında 4K e soğutulmuştur. Deneyden önce 120K de yay da 1Tesla alan uygulanarak mıknatıslanmıştır. Şekil 42'de 4K de alınan Abrikosov girdap kristalinin MKM modunda alınan görüntüleri verilmiştir. Deneyler 65nm ile lift mode ile tapping mode'da kullanarak icra edilmiştir.







Şekil 42. BSCCO numunede Abrikosov girdap kristalinin 4K de elde edilen MKM görüntüsü.

7. Sonuçlar

Bu projede CNR İtalya grubu ile sıkı bir işbirliği ile çalışmalar yürütülmüştür. MKM'nun geliştirilmesi kısmı Sabancı Üniversitesinde, MKM uçlarının FIB vb. yöntemlerle iyileştirilmesi ve manyetik karakterziasyon numunelerinin hazırlanması kısmı ise daha ağırlıklı olarak CNR'de yapılmıştır.

Bu projede 1fm/√Hz gürültülü, yüksek hassasiyetli Fiber Fabry-Perot interferometresi (FFPİ) kullanan bir DS-AKM/MKM sistemi geliştirilmiş ve mikroskop 4-300K aralığında AKM ve MKM modelarında başarılı bir şekilde denenmiştir. Yüksek Çözünürlüklü Manyetik Görüntüleme deneylerine tam vakit kalmasa da çalışmalarımız 10nm'den daha iyi yatay çözünürlük elde etmek üzere devam etmektedir. Dünyada bu gürültü seviyesinde bir araştıma ya da ticari mikroskop bulunmamaktadır. Kanımızca proje oldukça başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.



7.1. Proje Süresince Proje Kapsamında Yapılan veya hazırlanan Yayımlar ve Toplantılarda Sunulan Bildiriler

Bu proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların bir kısmı 'Design of a selfaligned, wide temperature range (300 mK-300 K) Atomic Force Microscope/Magnetic Force Microscope (AFM/MFM) with 10 nm MFM resolution - Özgür Karcı, Münir Dede and Ahmet Oral' isimli makale olarak Rev. Sci. Instrum. 85, 103705, 2014. Dergisinde basılmıştır.

Şu makale ise yayına hazırlanmaktadır:

Design of a 1fm/Hz noise Low Temperature (1.5K-300 K) Atomic Force Microscope/Magnetic Force Microscope (AFM/MFM) Özgür Karcı, Ümit Çelik, Münir Dede and Ahmet Oral

Elde edilen neticeler aşağıdaki uluslararası ve ulusal konferanslarda sunulmuştur:

- 1fm/√Hz Noise Level Fabry-Perot Interferometers & Radiation pressure excitation of Low Temperature Atomic Force & Magnetic Force Microscope (LT-AFM/MFM) in 20mK-300K Range Ahmet Oral, Çağrılı Konuşma, MSM15 Conference Antalya, 29 Nisan-3 Mayıs 2015
- State of the Art Scanning Probe Microscopes for Magnetic Imaging in 20mK-300K Range with 1fm/√Hz Noise Floor Ahmet Oral, Çağrılı Konuşma, ICSM 2014, Antalya

TÜBİTAK PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. AHMET ORAL
Proje No:	111T802
Proje Başlığı:	Alçak Sıcaklıklarda (1.5-300K) Çalışan Yüksek Çözünürlüklü Manyetik Kuvvet Mikroskobu Geliştirilmesi
Proje Türü:	Uluslararası
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. FEN-EDEBİYAT F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/07/2012 - 19/09/2015
Onaylanan Bütçe:	288555.0
Harcanan Bütçe:	201118.67
Öz:	Bu projede ultra düşük gürültülü bir düşük sıcaklık atomik kuvvet / manyetik kuvvet (DS- AKM/MKM) mikroskobu sistemi geliştirilmiştir. Yeni tasarlanan mikroskop ile yayın sapması yüksek ?finesse?li bir fiber optik Fabry-Perot interferometre kullanılarak ölçülür hale getirilmiştir. Fabry-Perot interferometresini yüksek performansla çalıştırıbilmek için ise mikroskop fiberi yaya göre hareket ettirebilecek bir şekilde tasarlanarak yeniden imal edilmiştir. Fiber yay?a bir kaç mm uzaklıktan yaklaşık 1µm kadar yakına kadar getirilebilmektedir. DS-AKM sistemi ile 1.5-300K arası çalışma AKM ve MKM kiplerinde başarılmış ve dünyada bir rekor değer olan ~1fm/Hz^0.5 gürültü seviyesi elde edillmiştir.
Anahtar Kelimeler:	Atomik Kuvvet Mikroskobu, Manyetik Kuvvet Mikroskobu, Fabry-Perot Interferometre
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır