

Diss. ETH No. 19742

High Frequency Atomic Force Microscopy

A dissertation submitted to the
ETH ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

RAOUL ENNING

M.Sc. ETH
born 5 September 1980
citizen of Germany and the United States of America

Prof. Dr. A. Stemmer, examiner
Dr. U. Duerig, co-examiner

Zürich, 2011

Abstract

The cantilever deflection sensor is one of the most important and sensitive elements of the atomic force microscope (AFM). Of all methods proposed to detect cantilever deflection, the optical beam deflection method (OBD) is the most widely used due to the ease of beam alignment and simple experimental setup. Theoretical studies have suggested that OBD sensitivity should be equal or even significantly better than alternate detection techniques, like interferometric detection. However, experimentally, interferometric detection methods have proven to be more capable of satisfying low noise and bandwidth requirements.

The bandwidth of the deflection sensor defines the frequency limit of data acquisition from the rapid motility of the mechanical cantilever / surface interaction. In addition, the noise performance of these OBD sensors can limit the sensitivity of detectable deflections and can reduce or influence the stability of lock-in amplifiers, phase locked loops, and other cantilever control mechanisms. Optimizations and advances of these sensors in bandwidth and noise would allow the use of high spring constant, high resonance frequency cantilevers resulting in improvements of both scan speed and resolution. Improving the smallest detectable amplitudes will allow a very local probing of the surface forces, resulting in higher resolution imaging. It has been shown previously that improvements in OBD readouts that reach noise levels dictated only by the thermal oscillations of the cantilever while maintaining high bandwidths are possible.

In this thesis, we extended and improved AFM bandwidth, noise and resolution in ambient conditions by redesigning the electrical and electrooptical components of the beam deflection technique. Through the invention of a novel optical beam deflection readout, we are able to directly measure oscillations in excess of 20 MHz without an increase in noise levels. Theory suggests that increases in cantilever resonance frequencies can improve the thermal noise limitation of the cantilever by a significant factor as well as decreasing the response latency of the oscillating cantilever, thus allowing more rapid scanning. Increasing the measurement bandwidth of AFM while maintaining a very low noise level can thus create new opportunities in lateral and topographical resolution, high-speed scanning, force spectroscopy measurements, utilizing higher eigenmodes and their resulting multi-frequency operations, minimum detectable amplitudes, and improved resolutions in Kelvin probe force microscopy techniques. As the noise of any system is only as low as it's strongest contributor, the laser light source used in the beam deflection was high frequency modulated in order to reduce the invasive longitudinal

mode hopping of the laser, and show that this technique significantly improves noise for certain situations.

Finally we show that the newly developed microscope has the sensitivity to achieve very high resolution images in ambient conditions, using high frequency cantilevers on mica and HOPG samples.

Zusammenfassung

Der Biegebalkenauslenkungssensor ist eines der wichtigsten und empfindlichsten Elemente des Rasterkraftmikroskopes (AFM). Von allen potentiellen Methoden zur Erkennung einer Balkenauslenkung ist die Methode der optischen Strahlablenkung die am weitesten verbreitete (OBD), unter anderem wegen der Leichtigkeit der Strahlausrichtung und des einfachen Versuchsaufbaus. Theoretische Untersuchungen haben ergeben, dass OBD-Empfindlichkeiten gleichauf oder sogar deutlich besser sein sollten, als alternative Methoden zur Erfassung von Strahlablenkungen wie die interferometrische Erkennung. Experimentell sind interferometrische Erkennungsverfahren dem Strahlablenkungsverfahren in Bandbreite und Rauschverhaeltnissen ueberlegen.

Die Bandbreite des Auslenksensors limitiert die Erfassungsfrequenz der Wechselwirkung zwischen der mechanischen Spitze und der Oberflaeche. Die Rauschleistung dieser OBD-Sensoren begrenzt die Empfindlichkeit einer nachweisbaren Auslenkung; dieses wiederum reduziert die Stabilitaet von Lock-in Verstaerkern, Phasenregelschleifen und andere Reglermechanismen. Optimierungen dieser Sensoren auf hoehere Bandbreiten und verringertem Rauschen ermoeglicht die Verwendung von Biegebalken mit hoher Federkonstante und hoher Resonanzfrequenz. Dieses wiederum verbessert die Scan-Geschwindigkeit und Aufloesung. Kleinere nachweisbare Amplituden ermoeglichen eine sehr lokale Sondierung der Oberflaechenkraefte, was zu einer hoeheren Aufloesung beitraegt. Bereits frueher haben Verbesserungen bei OBD Sensoren die Rauschbelastung soweit reduziert, dass nur die thermischen Schwingungen des Biegebalkens die Empfindlichkeit des Systems limitiert.

In dieser Arbeit wird die AFM Bandbreite, das Rauschen und die Aufloesung erweitert und verbessert durch die Neugestaltung der elektrischen und elektrooptischen Komponenten der Strahlauslenkungstechnik in einem vorhandenen AFM. Durch die Erfindung eines neuartigen optischen Strahlablenkungssensors, koennen wir direkt Schwingungen von ueber 20 MHz messen ohne eine Erhoehung des Rauschpegels. Die Theorie besagt, dass eine Erhoehung der Resonanzfrequenzen die Begrenzung des thermischen Rauschens des Biegebalkens um einen wesentlichen Faktor reduziert, sodass noch kleinere Amplituden aktiv angeregt werden koennen. Die gleichzeitige Erhoehung der Messbandbreite und der sehr geringe Geraeuschepegel eroeffnen somit neue Chancen in lateraler und topographischer Aufloesung, im Hochgeschwindigkeitsscannen, in spektroskopischen Messungen, in der Ausnutzung hoeherer Eigenmoden und dem daraus resultierenden Multi-Frequenz-Betrieb, in den kleinsten messbaren Amplituden, und in

einer verbesserten Auflösung in Raster-Kelvin-Mikroskopie-Techniken. Die Rauschbelastung eines Systems ist nur so niedrig wie der stärkste rauscherzeugende Faktor. Der Speisestrom in der Laserlichtquelle wird deswegen hochfrequent moduliert, um den invasiven "Mode Hopping" des Lasers zu reduzieren; es wird gezeigt, dass diese Methodik die Rauschstabilität in bestimmten Situationen erheblich verbessert.

Zum Schluss zeigen wir, dass das neu entwickelte Mikroskop die Fähigkeit hat, atomar aufgelöste Bilder mit hochfrequenten Spitzen in Umgebungsbedingungen auf Glimmer und HOPG zu erzeugen.