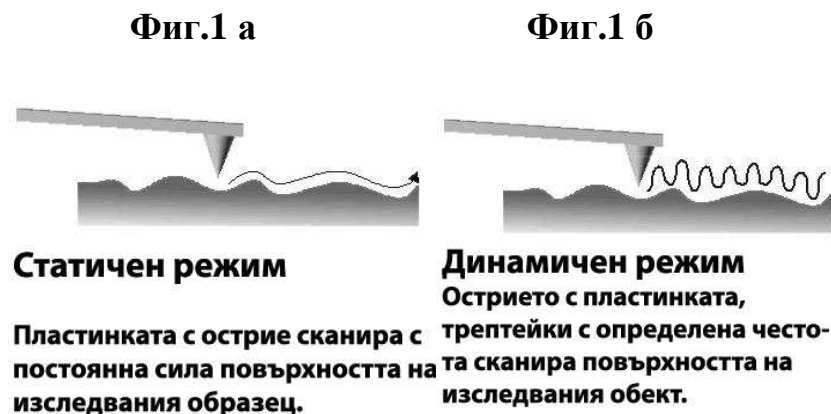


# АТОМНО СИЛОВ МИКРОСКОП

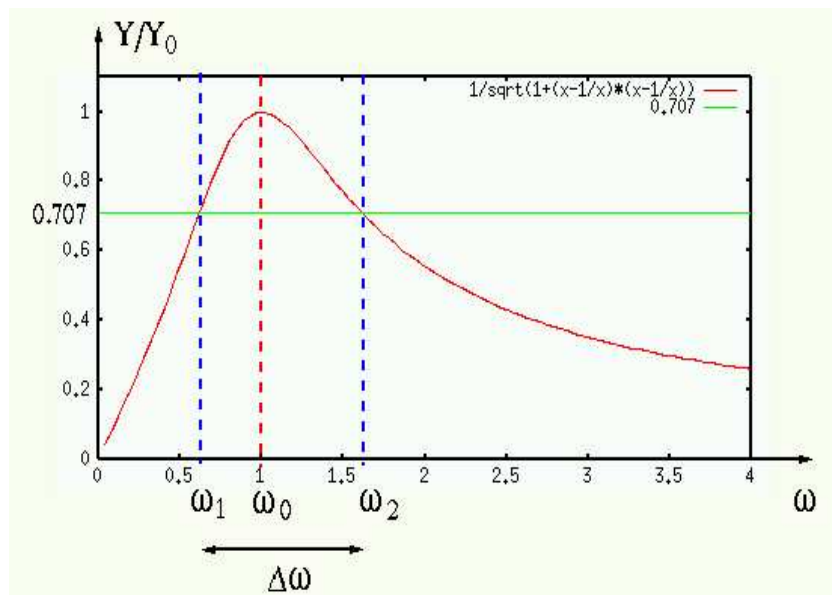
## Принцип на работа на Атомно Силовия Микроскоп (Atomic Force Microscope - AFM)

По-общото наименование на Атомно-силовия микроскоп е Микроскоп със сканиране на острието (Scanning Proximity Probe Microscope). Това наименование отразява факта, че общото в този тип уреди е наличието на тънко (типичен радиус на кривина около 10 nm) острие, което се сканира над изследваната повърхност. Измерваните сили на взаимодействие на това острие с повърхността, обаче са най-различни, откъдето и големия брой (над 15) изследователски методики, като непрекъснато се добавят нови методики. По-надолу ще започнем с описание на основната методика – Атомно-силова микроскопия, при която чрез изследване на Ван дер Валсовите взаимодействия се изследва повърхностната топология на образеца.

На Фиг.1 а и Фиг.1 б са показани двата основни режима на работа на Атомно Силовия Микроскоп - статичният и динамичният режими.



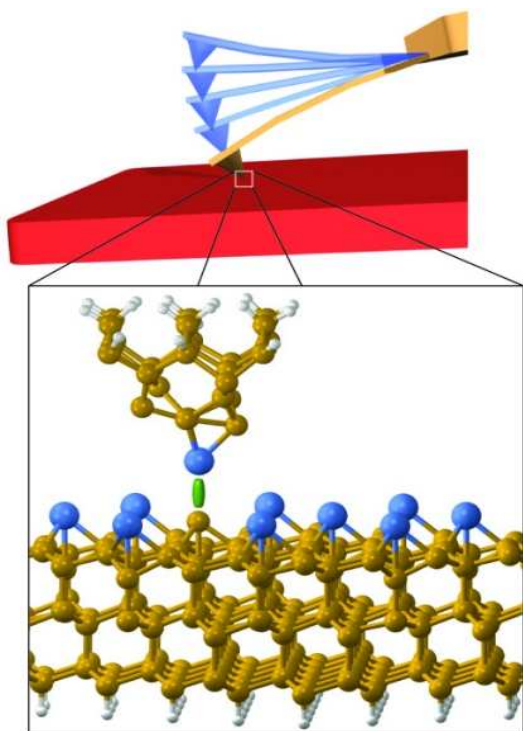
На Фиг.2 е показано схематично принципът на най-разпространеният режим на работа на AFM - динамичният режим. Основният чувствителен елемент в него използва съществено резонансните свойства на акустичните вълни на огъване, разпространяващи се в тънки пластинки с крайни размери. На Фиг.2 е показана тънка пластика, здраво заловена в единия си край с висок Q-фактор на резонансната си крива. В другия край на тънката пластинка е поставено здраво заловено към нея тънко прецизно изработено обикновено от диамант или полупроводник триъгълно острие, което заедно с пластинката трепти близо над



изследваната повърхност, оцветена на Фиг.2 в червено. Амплитудата на трептене на пластиката с острието е особено чувствителна към силите, които могат да действуват върху нея в режим на резонанс или на такъв близък до него, защото в този режим генерираната амплитудата на трептене се усилва  $Q$ -пъти.

Обикновено качественият фактор  $Q$  варира в интервала от няколко стотици до десетки хиляди пъти и повече. На Фиг.3 е показана амплитудно-честотната характеристика на тънката пластинка с диамантеното острие т.е. показана е относителната амплитуда  $Y/Y_0$  ( $Y_0$  е амплитудата на трептене на резонансната честота  $\omega_0$ ) на трептене на една такава система (пластинка с диамантено острие) като функция на честотата  $\omega$  и с  $Q$ -фактор  $Q = \omega_0/(\omega_2 - \omega_1)$ . Тя е възбудена от

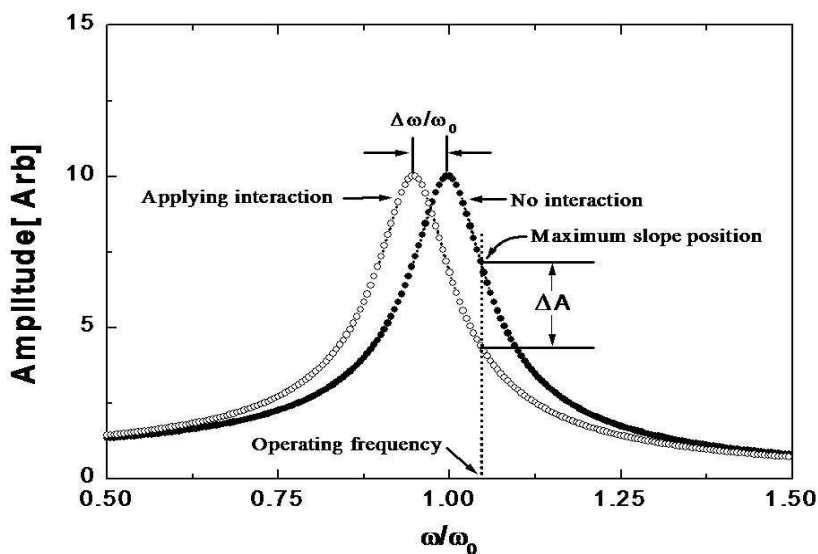
едновременно действащата пондермоторна електрическа сила  $F = F_{\sim} + F_{=}$  на единица площ от системата тънка пластинка с острие-изследван обект (подложка) с постоянна  $F_{=}$  и променлива  $F_{\sim}$  компоненти съгласно равенството:



$$F = \epsilon[(E_{=} + E_{\sim}\sin(\omega t + \varphi))^2]/2 = \epsilon[(U_{=} + U_{\sim}\sin(\omega t + \varphi))^2]$$

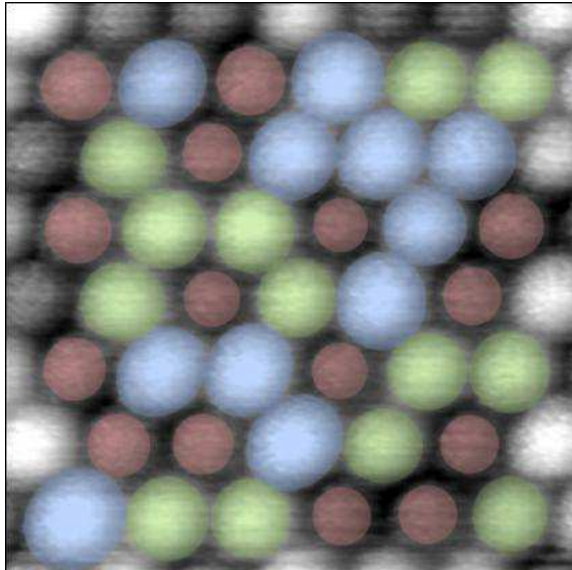
$$\epsilon[(U_{=}^2 + 2U_{=}U_{\sim}\sin(\omega t + \varphi)]/2d^2 = \epsilon E_{=}^2/2 + \epsilon E_{=}E_{\sim}\sin(\omega t + \varphi)$$

Фиг.2



В формулата (1)  $\epsilon, E = (E_{=} + E_{\sim}\sin(\omega t + \varphi)), U = (U_{=} + U_{\sim}\sin(\omega t + \varphi))$  са означени диелектричната проницаемост, променливите и постоянни компоненти на електричното поле  $E$ , съответно на напрежението  $U$ , фазата на трептящата пластинка с диамантено острие, както и средното разстояние между пластинката с диамантеното острие и изследваният обект. Във формулата (1) поради

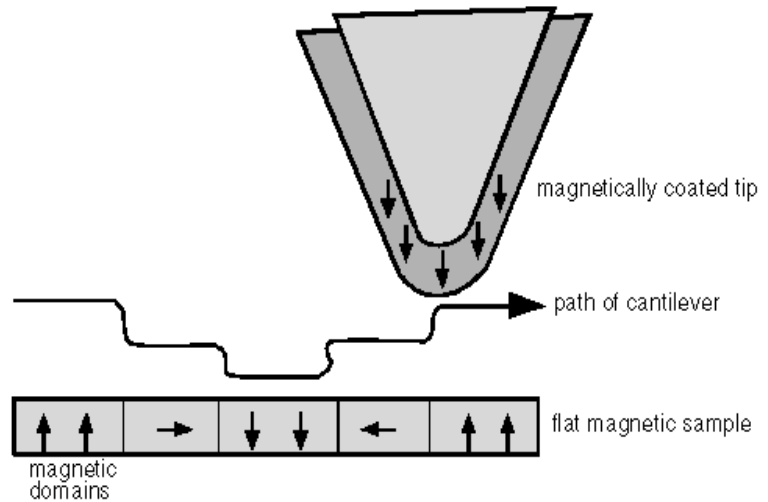
високият Q-фактор на системата и нейният резонансен отклик нечетните хармонични са пренебрегнати като малки членове от по-висш порядък. Постоянното външно електрично поле  $E_{\perp}$  определя в малки граници (до 10%) както резонансната честота  $\omega_0$ , така и амплитудата на трептене на пластинката, както се вижда от последния член на формула (1). Трептенето на пластинката с



Фиг.5

използването на фазово-чувствителен детектор (Lock-in усилвател), който отделя полезния сигнал  $S$  от останалите, включително и от шумовете  $N$  с чувствителност превишаваща отношението  $N/S \geq 100$ .

диамантеното острие обикновено чрез система от лазер, огледала и фотодиод се преобразува в променлив електричен сигнал, който се обработва с аналогова и цифрова технология, за да се получат съответните данни за всяка точка от повърхостта при сканирането на изследвания обект с диамантното острие. Съществен елемент от обработката на сигнала е

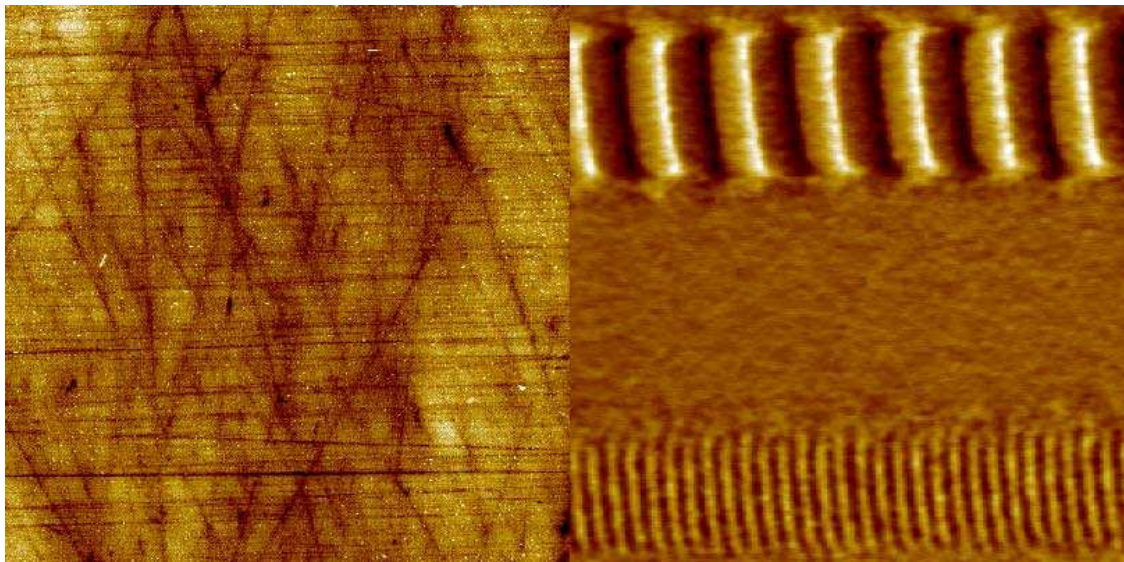


Фиг.6

На Фиг.2 в правоъгълния прозорец е показан принципът на работа на AFM чрез картината на атомно ниво на части от подложката и на диамантеното острие във фазата на най-голяма близост между тях. Липсата на атом от повърхостта на образеца и наличието на свободна химическа връзка там, показана на фигурата със зелен цвят е равносилно на появата в тази локална област на допълнително постоянно електрично поле  $E_{\perp}^{loc}$ , така че общото постоянно електрично поле в тази локално област става  $E_{\perp} + E_{\perp}^{loc}$ . Това довежда автоматично както до малка промяна в резонансната честота  $\omega_0$ , така и до промяна в амплитудата на възбуждащата сила, както се вижда от последния член на равенство (1). Крайният резултат от това е показан на Фиг.4, където следствие на малкото изменение на резонансната честота  $\omega_0$  с  $\Delta\omega$  се изменя и амплитудата с  $\Delta A$  на трептящата пластинка с диамантеното острие. Така тези малки локални

промени в амплитудата на трептене на пластинката с острие при сканирането на изследвания образец изграждат топологията на неговата повърхност. Острието на пластинката освен на сили с чисто електрически произход реагира и на Вандер Ваалсови сили, на магнитни сили и т.н. Така например на Фиг.5 е показана картината на моноатомен слой от калаени и оловни атоми, оцветени в синьо и зелено съответно, нанесени чрез изпарение върху силициева подложка. Силициевите атоми на подложката са оцветени в червено. Причината за регистрацията на отделните неутрални атоми от изследваната повърхност са именно Вандер Ваалсовите сили на взаимодействие. При изследване на топологията на магнитни повърхности пък се използват магнитните сили, които възникват между магнитните домени на изследваната повърхност и тези от магнитния слой (например 15 nm тънък  $Co_{80}Ni_{20}$  слой) върху острието, както е показанона Фиг.6. Самото острие понякога е от магнитен материал, който играе същата роля както

тази на тънкият магнитен слой от Фиг.6. На Фиг.7 са показани две области от твърд магнитен диск на АВМ изчислителна машина, сканирани с Атомно силовия микроскоп .



Фиг.7

Лявата е повърхност от магнитния диск без магнитен запис на числа в цифрова форма върху нея, докато в дясната е показан такъв запис (1 1 1 1 1 1 1) чрез формиране на поредица от магнитни домени върху нея.

### Атомно Силов Микроскоп на *Anfatec Instruments AG, Германия*

Във *Лабораторията по физика и техника на полупроводниците* към Физическия факултет на Софийския Университет "Св. Климент Охридски" на адрес: Галичица 33а беше доставен и монтиран АФМ с възможности за EFM и MFM от *Anfatec Instruments AG, Германия*. Трябва специално да се отбележи, че не ни е известно в света да има друг АСМ, който може да работи и в динамичен режим и да струва под 30 000 евро с опциите. Благодарение на дългогодишните ни контакти с Anfatec и на надеждата да последват още продажби, беше удовлетворена молбата ни да бъде доставен максимално универсален и прецизен уред, като ни беше направена отстъпка от няколко хиляди евро от цената. Допълнително, без да заплащаме (стандартно тази услуга струва 4000 евро), дойде един от собствениците на фирмата, за да инсталира уреда и обучи обслужващия персонал.

В продължение на три дни - от 09.12.2007 до 11.12.2007 в присъствието на пристигналият от Германия специалист д-р Anne Müller бяха извършени както пълни тестове на системата на Атомно-силовия микроскоп, включващи и гаранционното обслужване, така и демонстрации и обучение на български обслужващ персонал, преподаватели и студенти. На Фиг. 8 са показани снимки от гореспоменатата работа в лабораторията през това време.



Фиг.8

**Основни характеристики на Атомно-силовия микроскоп, произведен от Anfattec Instruments AG, Германия, доставен в България:**

- Много ефективна тристепенна антивибрационна система, осигуряваща нива на шума от под 0,5 nm на втория етаж на сградата на ул. Галичица;
- Латерална разделителна способност при атмосферни условия < 5nm;
- Вертикална разделителна способност < 0,2 nm (атомни стъпки и слоеве);
- Един от най-бързите електронни блокове на пазара: скорост на опресняване на данните – 40 kHz, ширина на усилвателите – над 700 kHz;
- Диапазон на сканиране по X и Y - 48  $\mu$ m, 8  $\mu$ m по Z. Ръчно позициониране по X и Y – 6 mm. Грубо позициониране по Z с три стъпкови мотора – възможност за нивелиране на образца;
- Хардуерна и софтуерна линеаризация на сканера;
- Възможност за събиране на данни с висока разделителна способност – до 2048 на 2048 точки.
- Оптична видеокамера (365 x 465 точки) с фокусираща оптика и двустепенно ниво на осветяване;
- Два вградени двуфазни нискошумящи lock-in усилвателя с лента над 1 MHz;
- Възможност за едновременно събиране и визуализация на до 8 канала;
- Софтуера за управление, събиране и първоначална обработка на данните е с отворен лиценз и ни е предоставен сорс кода. Скоро ще е възможна кирилизацията му;
- Мощен анализиращ софтуер с 3D визуализация, оптимизиране на картината, филтри, премятания (например грапавост).

Заедно с микроскопа ни бяха предоставени и около десетина специално разработени упражнения за студенти. В тях наред с теоретичната част са описани и стъпка по стъпка изпълнението на упражнението на уреда и въпроси за упражнението. Те показват редица методи и експерименти възможни с този уред:

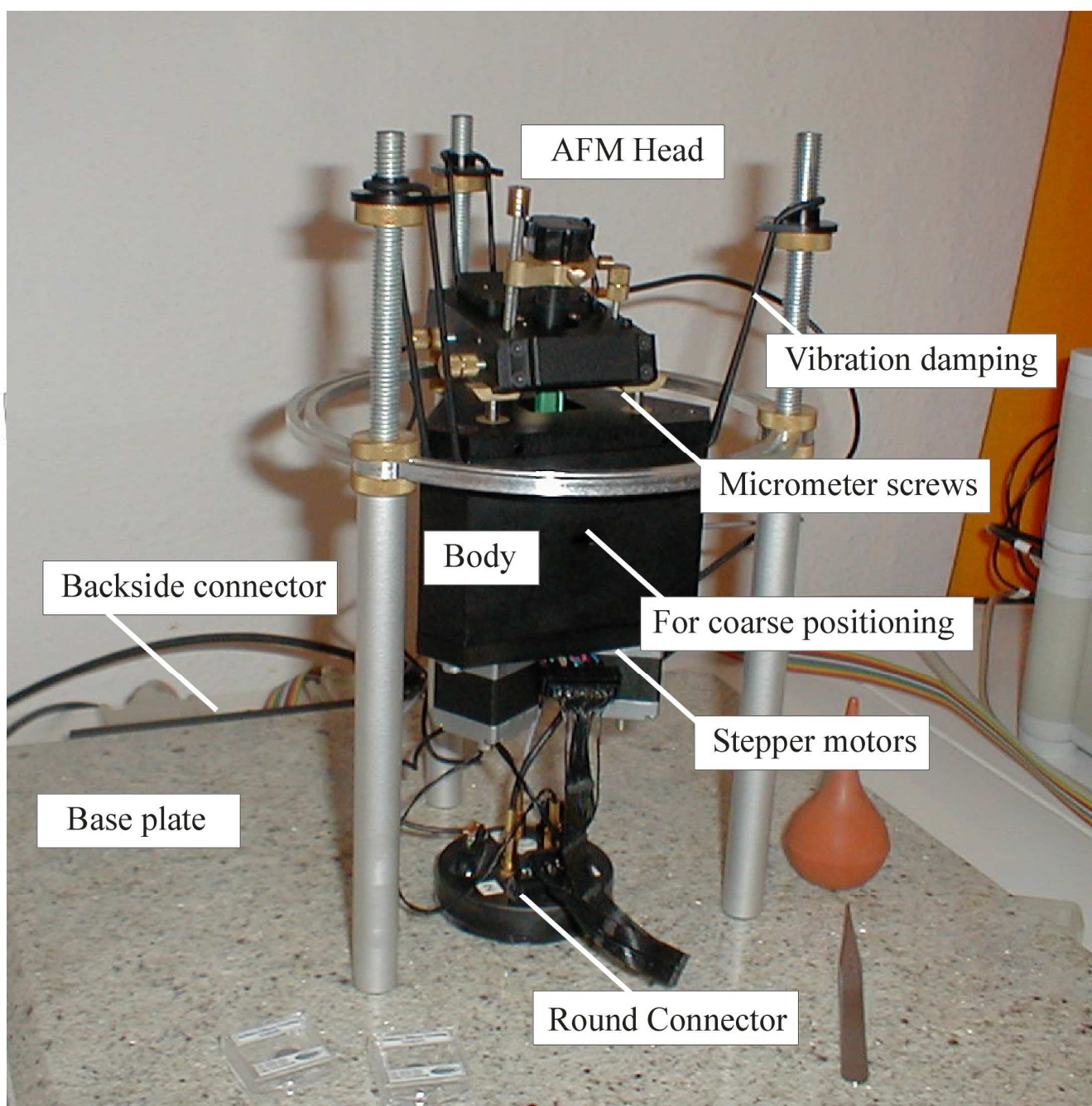
- Контоктен режим на работа;
- Силова спектроскопия (Force Spectroscopy);

- Модулацията на силата (Force Modulation), където чрез добавяне на малка модулирана амплитуда в контактен режим и следене на фазовия канал може да се съди за твърдостта на образеца;
- Микроскопия на силата на триене (Lateral Force Microscopy, Friction Force Microscopy);
- Динамичен (безконтактен) режим на работа. Изследване топографията на образеца;
- Микроскопия на магнитните сили;
- Микроскопия на електричните сили;
- Микроскопия на електричните сили на специален полупроводников образец. Различни модификации на метода – Kelvin Probe Microscopy за изследване на капацитета, изследване на отделителната работа.

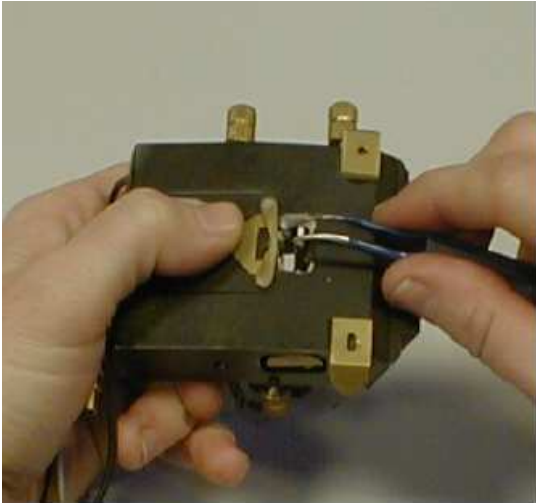
На Фиг.9 е показан външният вид на тялото на АСМ, монтирано върху Основният плот (Base plate) на трикоординатната antivибрационна масичка.

Тялото се състои от три основни части: Основно тяло (Body), Глава на АСМ (AFM Head) и Кръгъл конектор (Round Connector) .

Основното тяло (Body) посредством еластични и гъвкави ластици е закрепено свободно върху трите здраво заловени към Основния плот (Base plate)

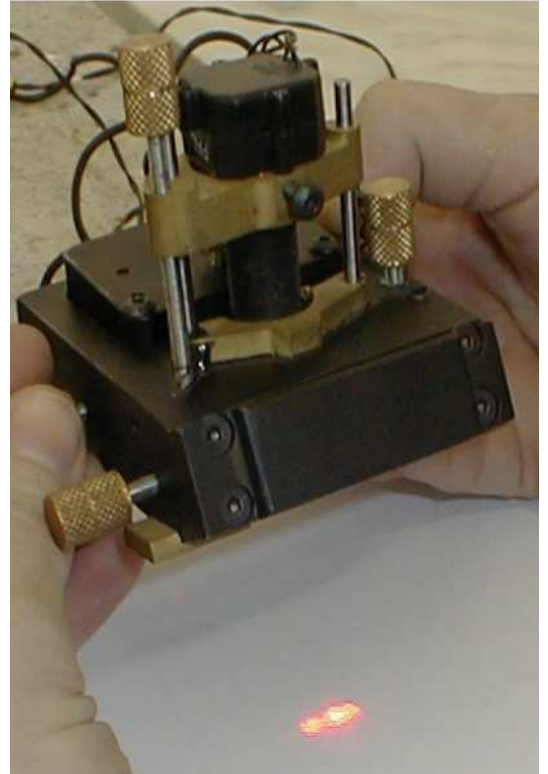


Фиг. 9



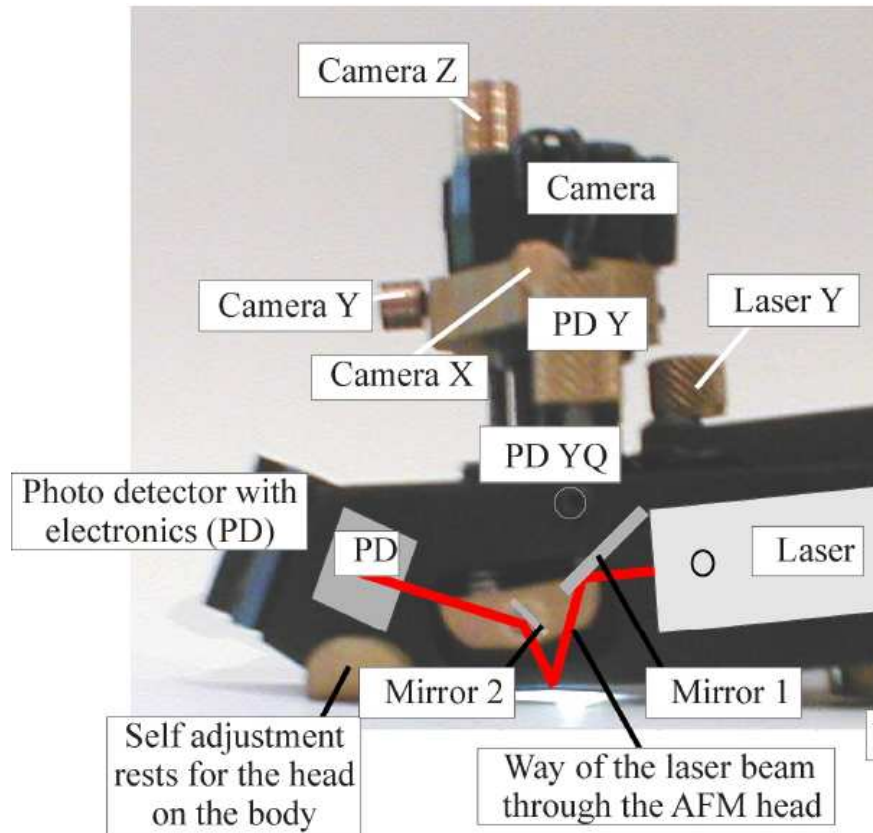
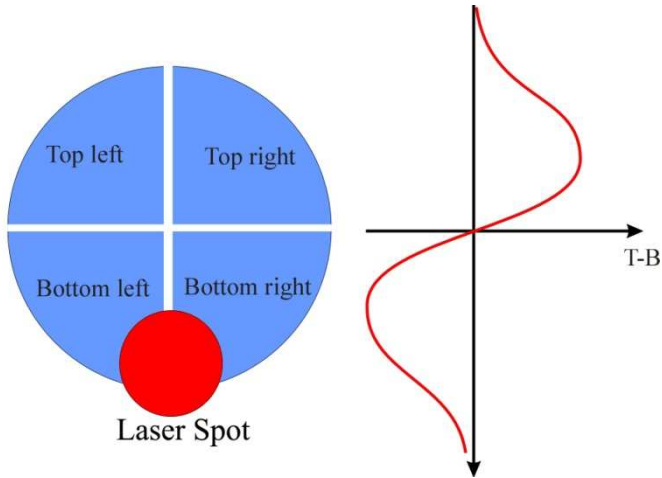
на антивибрационната масичка кръгли алуминиеви профили с резба в корните си крайща и разположени под ъгъл  $120^{\circ}$ , както е показана на снимката с оглед осигуряването на допълнителна

антивибрационна защита. Виждат се на Фиг.9 и два от трите стъпкови моторчета, също разположени под  $120^{\circ}$ , чиито микрометрични валове се използват за бърза електронно контролирано **позициониране по Z оста** на главата на Атомно силовия микроскоп (AFM Head). Те опират в ръчно задвижваните микрометрични винтове (Micrometer Screws) на Главата на Атомно силовия микроскоп (AFM Head) и заедно с тях формират системата за фина настройка на Главата. В Основното тяло (Body) са монтирани и два поставени под ъгъл  $90^{\circ}$  един спрямо друг Груби винта за грубо позициониране (For coarse positioning). Чрез Кръглия конектор (Round Connector) под Основното тяло (Body) на АСМ се осигурява гъвкавата електрическа връзка с измерителните и изпълнителни системи на АСМ.



Кръглия конектор (Round Connector) е директно свързан със Задния конектор (Backside connector), където са разположени стандартните куплунги за електрическа връзка с компютери-зираната цифро-ва система на АСМ. На Фигурата е показана технологията за закрепване, която включва захващането на Главата на АСМ (AFM Head) така, както е показано на Фигурата, повдигането с натиск на левия палец на пружиниращия държач от система на захват, поставянето с другата ръка на пластинката със сондиращото острие насочено нагоре чрез подходяща пинсета, перпендикулярно в държача и внимателното му освобождаване с оглед здраво залавяне на пластиката с острието в него.

Внимателно обръщане на Главата на АСМ (AFM Head), включване на лазерния диод и груба настройка с винтовете на АСМ докато пластиката, осветена от лазерния диод хвърли сянка, както е показано на Фигурата  
На Фигурата по-долу са показани предназначенията на микрометричните



Главата на ACM (AFM Head) за настройките. Ясно се виждат трите

микрометрични винта Camera X, Camera Y и Camera Z за настройката на миниатюрната CCD камера по X, Y и Z осите съответно (Camera), с резолюция 365 x 496 Pixels и с автоматична настройка на контрастността.

С червената линия на Фиг.12 е показан пътят (Way of the laser beam through the AFM head) на измерителния сноп на лазерния диод Laser по огледалата Mirror 1 и Mirror 2, трептящата пластинка, показана на фигурата в бяло, Фотодетектора (PD) и



и съгласуващата електроника към него (Photo detector with electronics (PD)). Виждат се и подпорите: (Self adjustment rests for the head on the body) и (backside rest), както и микрометричните винтове за настройка на лазера по Y (Laser Y) и Z (Laser Z) осите съответно. На Фиг.13 е показан принципът (Фиг.13) твие на Фотодетектора, съставен от четири квадранта Top left, Top right, Bottom left и Bottom right с общо лице по-голямо от това на лазерното петно. Тогава сумата:  $SUM = I_{TL} + I_{TR} + I_{BR} + I_{BL} = 0$  ,когато петното е в центъра на четирите квадранта. Тук с  $I_{TL}$  ,  $I_{TR}$  ,  $I_{BR}$  и  $I_{BL}$  са означени ел. токовете през съответните квадранти, пропорционални на частта от петното върху всеки квадрант. Чрез винтовете за настройка на огледалата и лазера

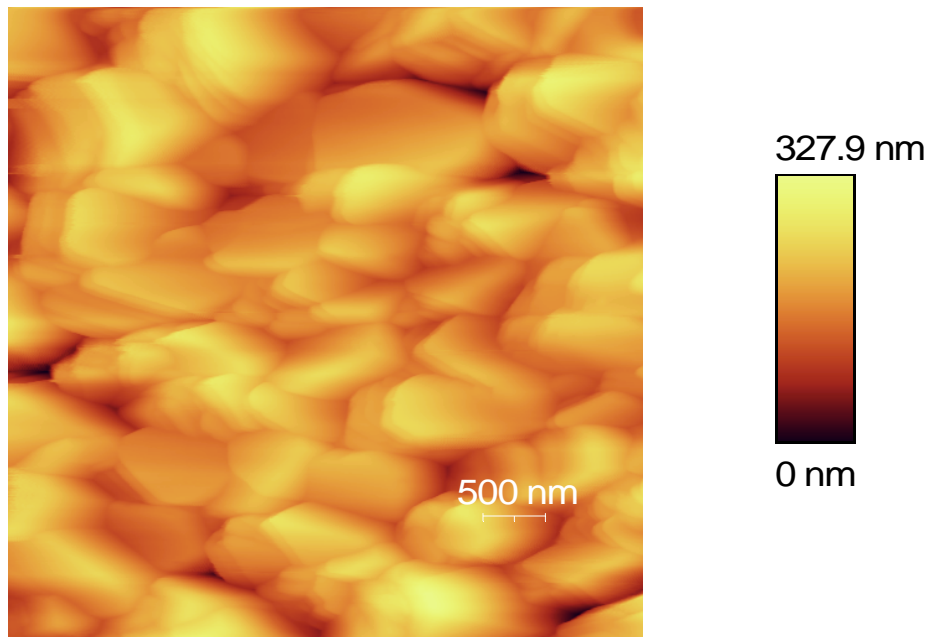
се постига точната настройка, когато токът през фотодиода минава през нула. На Фиг.14 е показана предната част на контролера на AFM с основните ел. свързвания към него. Тук се генерират ел. токовете за задвижване на изпълнителните механизми като синхронните моторчета, въртящи позициониращите микрометрични винтове, елементите на пиезо-електричната керамика за финната настройка и сканиране, управление, обмен и получаване на данни, управляем функционален генератор и т.н.

AFM на Anfatec Instruments AG, Германия е високотехнологичен уред за научни изследвания в областите на физиката, химията, биологията, медицината, материалознанието и други. Работейки в контактен и динамичен режими той дава възможност да се изследват, измерват и визуализират топографиите на повърхностите на изследваните обекти в наноразмерен мащаб, анизотропията на силите, действащи върху тях, тяхната природа в цялото им многообразие и произход (електрически, магнитен, Вандер Ваалсов и т.н.), както и топологията на други свойства като електрически капацитет, проводимост, вътрешно триене, твърдост, термични и диелектрични свойства и т.н. Позволява да се извършва също Нанолитография, както и други наноразмерни въздействия, като локални доменно или атомно намагнитване, електрическа поляризация и т.н.

AFM на Anfatec Instruments AG е комплектован с необходимия оригинален софтуер за управление и обработка на данните.

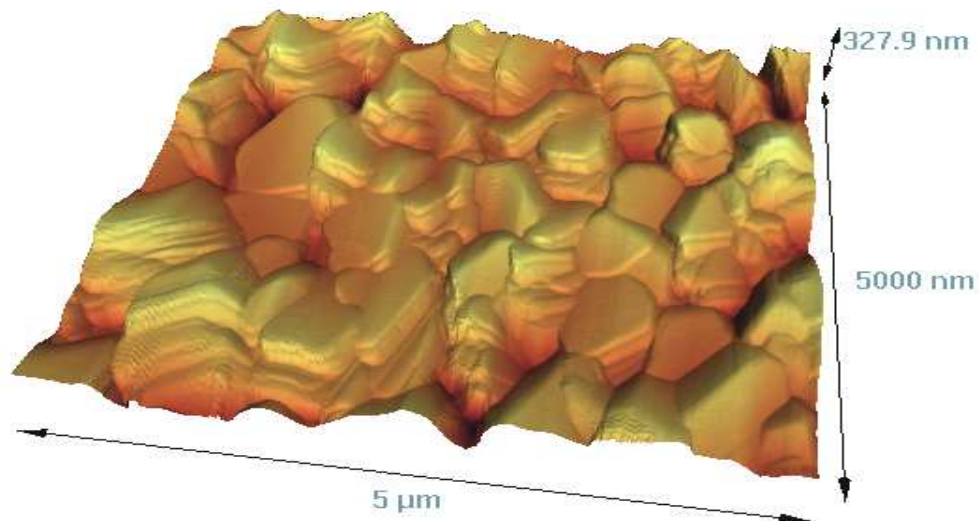
Така нареченият Eddy режим към него е изработен фирмено за да може чрез повече от 15 готови студентски лабораторни упражнения да се използва за обучение на студенти в модерната и бързо развиваща се област на нанотехнологиите. Студенти и студентски групи бяха на посещение за демонстрация на работата на AFM на Anfatec Instruments AG. Предстои те да бъдат доразвити и някой от тях да се предлагат и за дистанционно обучение.

Направени са и първите опити чрез технологиите на дистанционното обучение да се онагледяват "in vitro" лекциите, четени в учебните зали на Университетския комплекс на територията на квартал Лозенец, на IV километър и на бул. Руски. Необходима е обаче допълнителна окомплектовка, особено с достатъчно мощен/и UPS, за да се поддържа непрекъснатата работа на системата на AFM и за да се избегне влиянието на инцидентното прекъсване на електричния ток, качествени допълнителни камери (с достатъчно висока разделителна способност и автоматично следене на избран обект), допълнителен монитор/и, по-специализирана проекционна техника и други.



**AFM измервания с Anfattec Instruments AG, Германия**

**Образец: Тънък слой от SnTe , нанесен върху подложка от BaF, получен в Лабораторията по Физика на полупро-водниците към Физи-ческият Факултет на СУ "Св. Климент Охрид-ски". Показаната топографска картина е с размери: 5  $\mu\text{m}$  x 5  $\mu\text{m}$ , снета в динамичен безконтактен режим с амплитуда на трептене на сондиращото острие от порядъка на 100 nm и амплитуди на топографския релеф, дадени в цветовата гама, показана в дясно.**

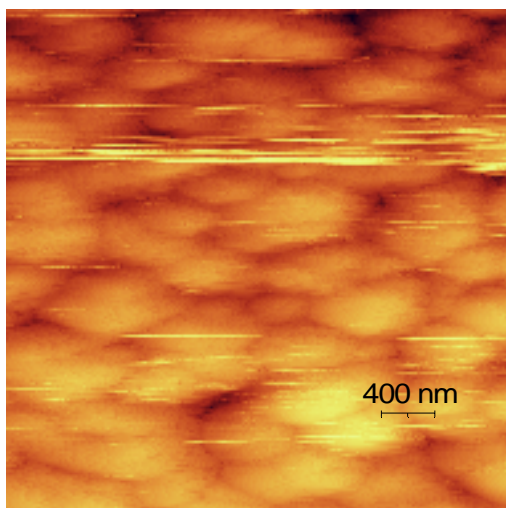


Тримерен образ на същата картина показана по-горе

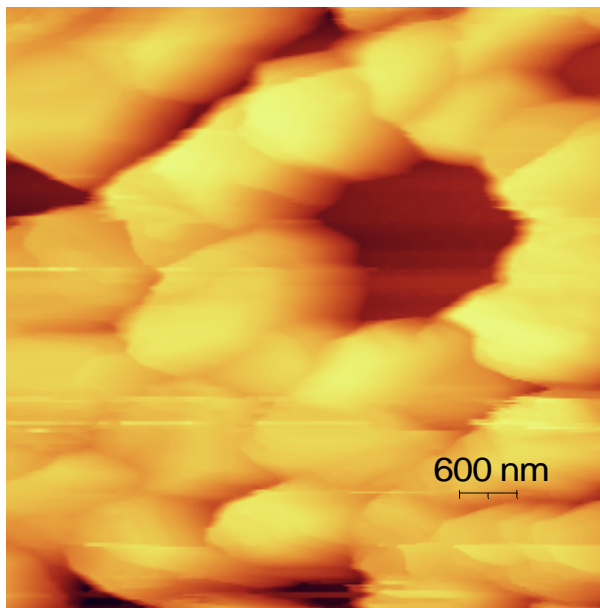
## **Е**лектрически измервания

Локален електрически капацитет и локална електрическа проводимост. Измерванията се извършват чрез прилагане на променливо **синусоидално** електрично поле между сондиращото острие и образеца с оглед определяне на разпределението на локалните капацитети и проводимости върху изследвания образец.

## Топография

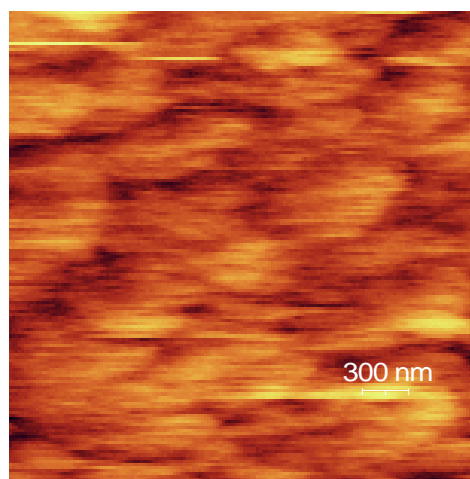
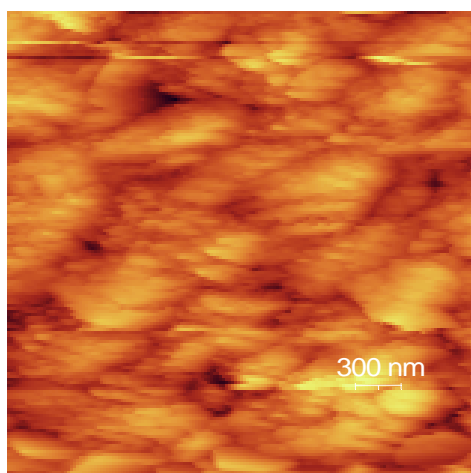


Капацитет



На Фигурата вдясно е показано разпределението на капацитета по зърната на повърхността. Колкото са по-голями зърната толкова капацитета е по-голям тъй като ефективната повърхност между острието и зърната е пропорционална на големината на зърната. Върху самите зърна капацитета също е различен тъй като зависи от локалната електрическа проводимост - по-тъмните области са с по-малка електрическа проводимост.

**Измервания на Електрическия потенциал:** Променливо ел. напрежение се прилага между острието и изследвания образец. Допълнително постоянно ел. напрежение се добавя така, че потенциалната разлика между острието и повърхността на образца потенциал върху образца с приложено компенсиращо постоянно напрежение.



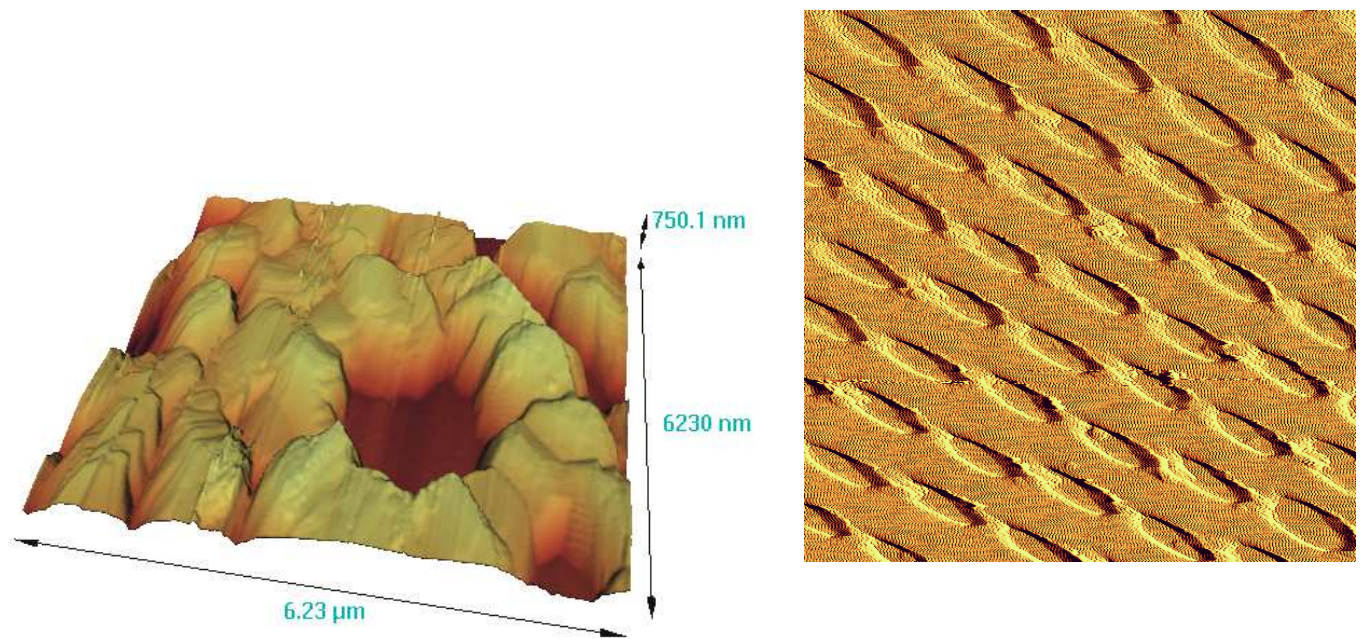
да е нула. Дясната крива показва топологията на повърхнинния електричен

## Топография

## Ел. повърхностен потенциал:

В дясно е показана картина на същия образец, снета обаче с по-голямо увеличение и с размери на изследваната повърхност повърхност:  $6.23 \mu\text{m} \times 6.23 \mu\text{m}$ .

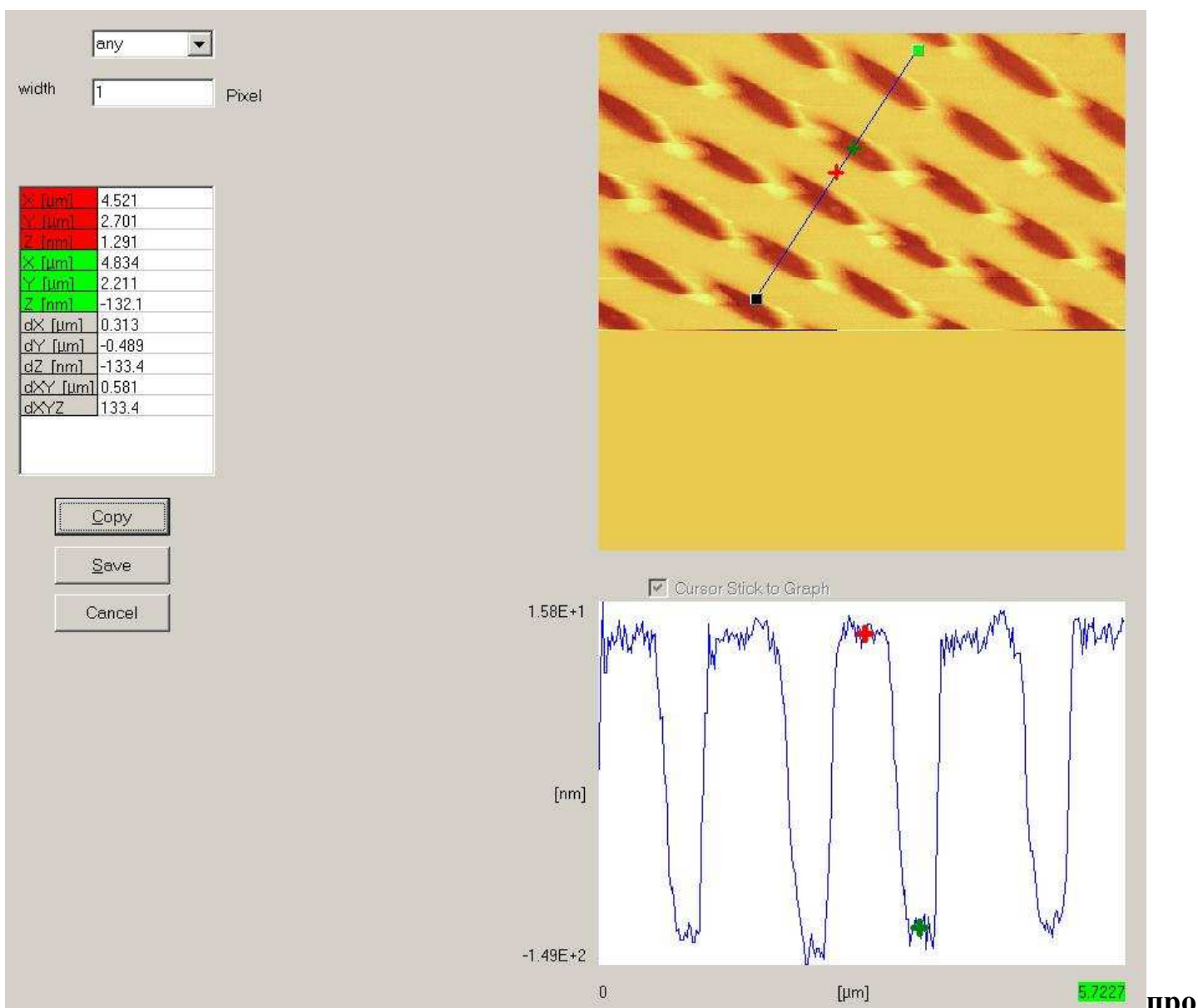
Височина от отделните зърна е приблизително: 490 nm; В дясно е показан мащабът на височината в дадената цвe-това гама.



По-долу за сравнение е показан и 3D образът на същата картина

На Фигурата вдясно е показана измерена-та с Anfatec Instruments AG, Германия негативна топограма на образец, предста-вляващ покрита с тънък златен слой полирана повърхност на Si-пластинка с ориентация [1.1.1] и с етцвани върху нея чрез фотолитография многобройни плит-ки ями с елиптична форма. Образецът е предоставен от катедрата по Физика на твърдото тяло и Микроелектроника при Физическия Факултет на СУ "Св. Кл. Охридски".

На долната фигура е показана картината от монитора на Anfatec Instruments AG в



процеса на измерването на тримерните координати на раз различни геометрични точки от полираната повърхност на Si-пластинка. Така например от стойностите на X, Y и Z -координатите на точките, отбелязани на фигурата с червено и зелено кръстчета могат да бъдат определени средните дълбочини на изработените ями и разстоянията между тях. На практика AFM дава възможност да бъдат измервани както абсолютните стойности на координатите на геометричните точки, така и точността на измерването им за произволна геометрична мрежа от точки от изследваната повърхност и с това да бъдат определяни желаните геометрични размери от повърхността на изследваните образци.

### Сравнение между измервания на един и същи, при едни и същи условия на образец проведени с Anfatec Level AFM и Veeco Multimode V

Обект:

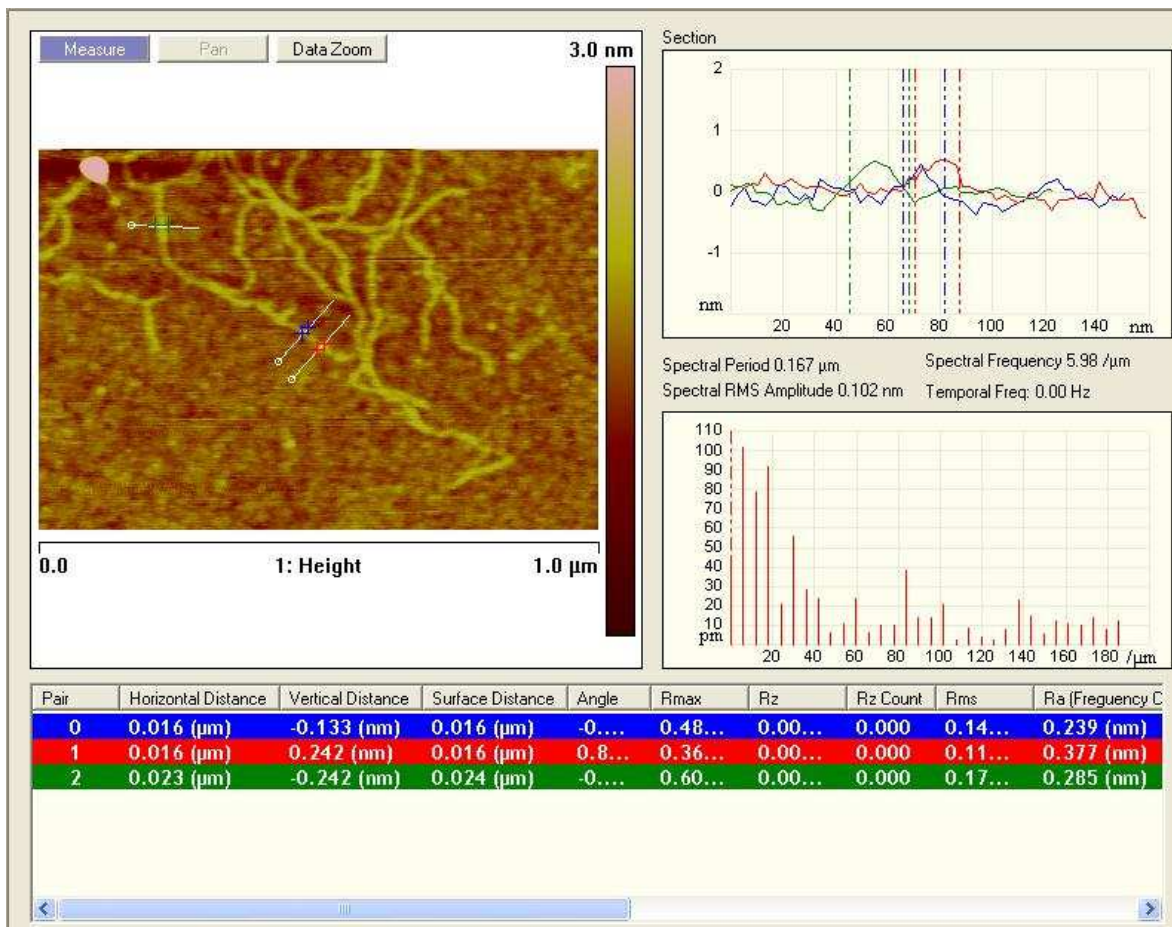
Монослой от феритни частици обвити в монослой от олеинова киселина с диаметър около 50 nm (частиците са от Тодор Ангелов от Институт по физика на твърдото тяло, БАН). Нанесен по метода на Лангмюир и Блоджет върху силициева пластинка (от Георги Иванов).

Измерване:

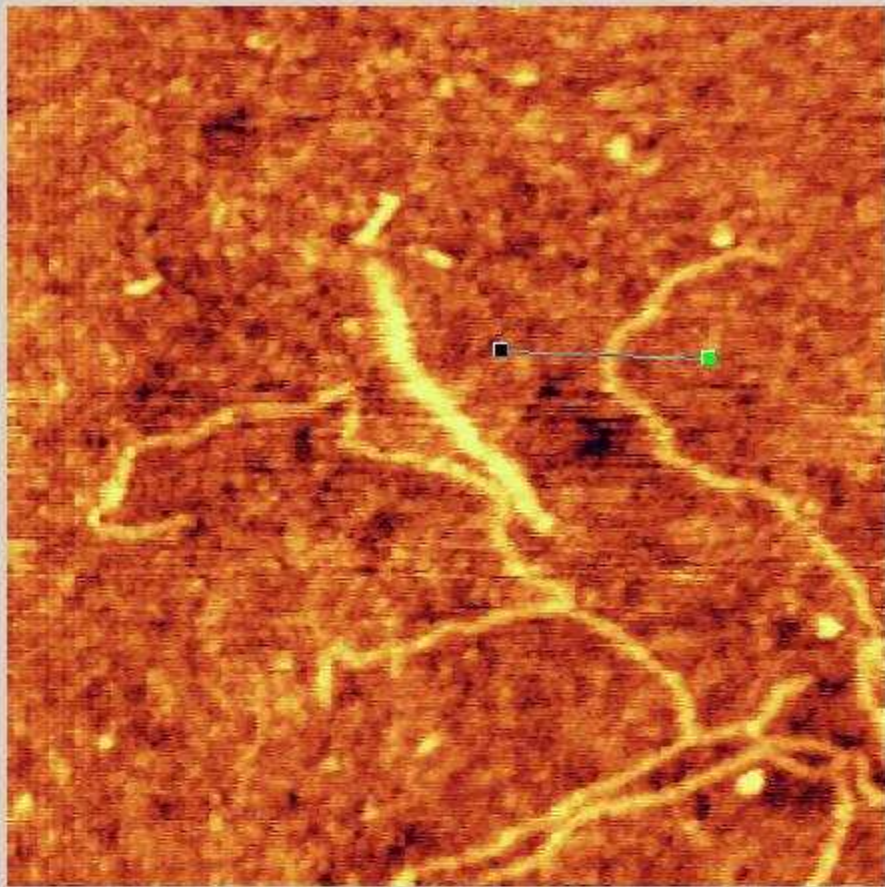
В условията на конференция в случая на Anfatec без никаква допълнителна виброизолация (без виброизолационна маса), в случая на Veeco – портативна

виброизолация. Използува се заточено острие (радиус на кривина около 1 nm).  
Динамичен режим на мерене (Tapping mode).

### Veeco MultiMode V



### Anfatec Level AFM



Cursor Stick to Graph

