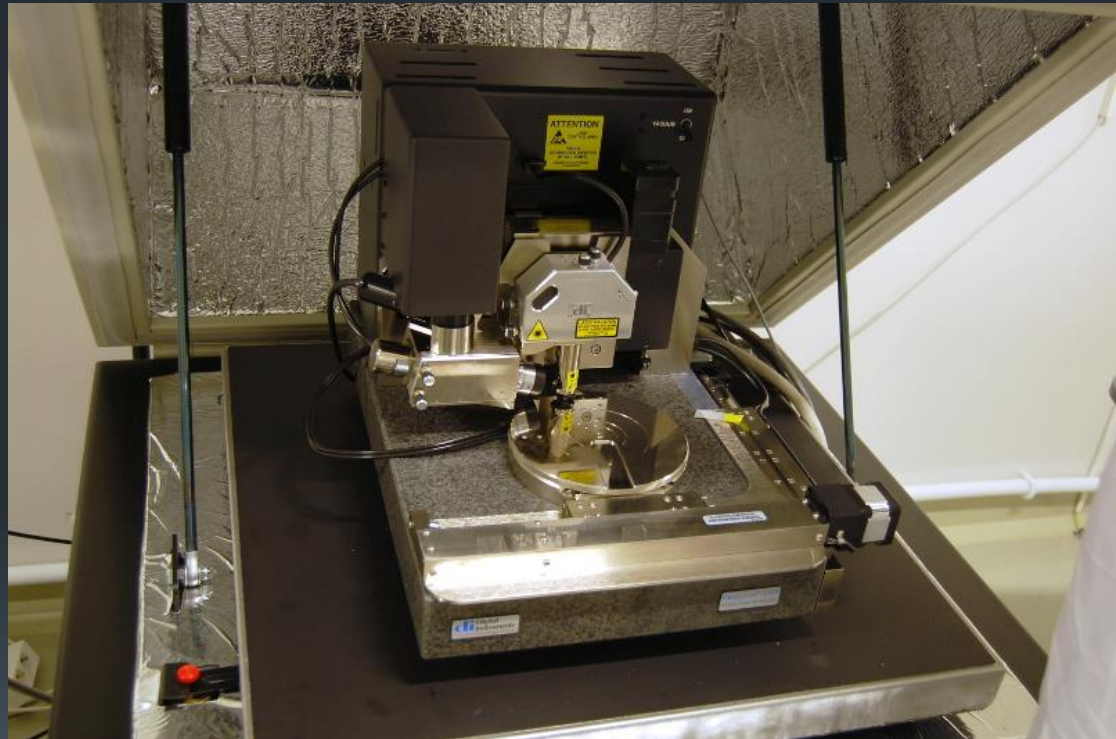




אוניברסיטת בן-גוריון בנגב
Ben-Gurion University
of the Negev

מרכז ננו-פבריקציה

מערכת Veeco dimension 3100 AFM



מבוא כללי

- בתחילת שנות ה-80 העולם הסתנוור מתמונת פני שטח ראשונה אמיתית של משטח סיליקון, בשימוש מערכות SPM (Scanning probe microscopes)
- כיום מערכות אלו משמשות למגוון רחב של תחומים, כולל אפיון מעמיק ומדעי של פני שטח של חומרים שונים, ניתוח רמת חספוס (Roughness) של פני שטח ואפילו הדמיה תלת מימדית של פני שטח ברמה אטומית, החל מאטומי סיליקון עד לכדי גדלים מיקרוניים של תאים חיים...
- מערכות אלו מסוגלות למדוד ולמפות בצורה מקומית בתחומים ננומטריים תכונות פיזיקליות של החומר כגון מוליכות חשמלית, התפלגות מטען סטטי על פני השטח, רמת חיכוך, שדות מגנטיים, פלורוסנציה, העברה אופטית ועוד...
- מערכות אלו פותחו מאוד והינן בעלות מגוון רחב של יכולות ויישומים רבים.

מערכת Scanning Tunneling Microscope (STM)

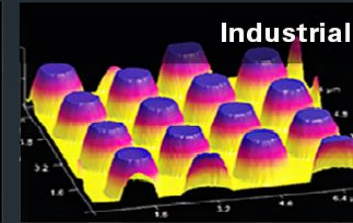
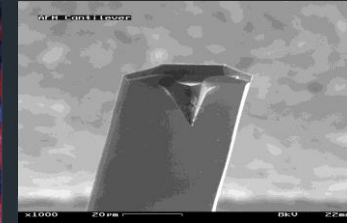
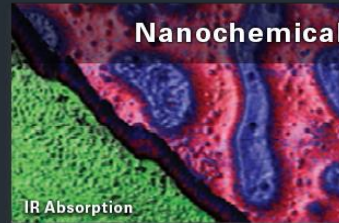
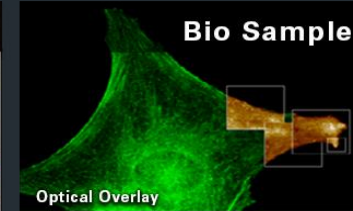
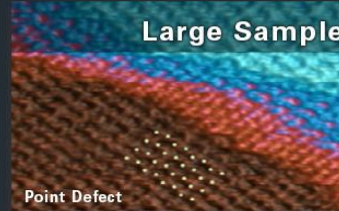
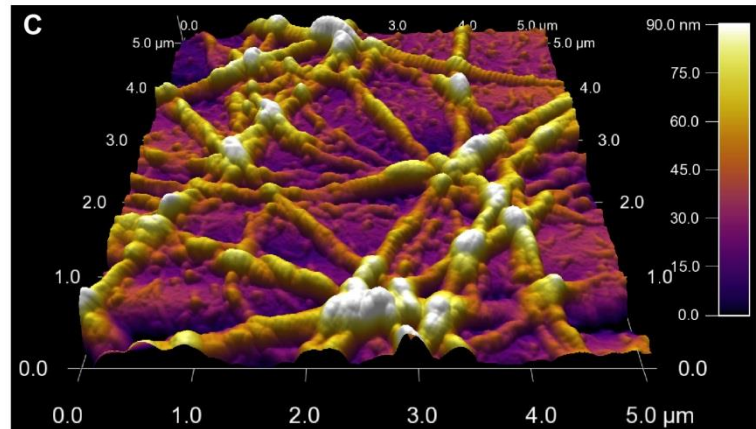
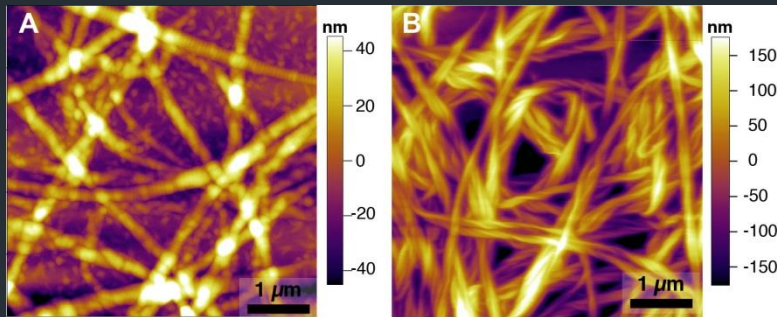


- **מיקרוסקופ מנהור סורק (STM)** הינו ה"אב הקדמון" לכל מערכות מיקרוסקופיית הסריקה. הומצאה בשנת 1981 בחברת IBM בציריך. ב-1986 ממצאיה, גרד ביניג והיינריך רוכר, זכו בפרס נובל לפיסיקה על המצאתם זו.
- מערכת זו מכילה טיפ חד מחומר מוליך, עם מתח קבוע (Bias) הניתן בין הטיפ ובין הדגם. הדגם עצמו חייב להיות מוליך או מוליך למחצה. הסריקה מתבססת על תופעת המנהור, תופעה קוונטית של מעבר אלקטרונים דרך מחסום פוטנציאל. כאשר הטיפ מוצב במרחק של בסביבות 10 \AA מהדגם, מחסום הפוטנציאל מספיק קטן ומאפשר לאלקטרונים מהדגם לעבור בסבירות מסויימת לטיפ ולהיפך, בתלות בכיוון המתח. זרם המנהור יהיה תלוי מחד במרחק החוד מפני השטח ומאידך בצפיפות מצבים קוונטיים פנויים על פני המשטח, כך שהזרם יגדל או יקטן בתלות אקספוננציאלית במרחק של הטיפ מהדגם. תלות זאת מאפשרת רגישות גדולה מאוד של המערכת, עד לכדי תת-אנגסטרמים בציר האנכי (Z) ורזולוציה אטומית בצירים האופקיים (X,Y).
- כך מתאפשר לבחון בעזרת המיקרוסקופ את פני השטח הפיסיקליים של הדגם וגם להבחין בסוגים שונים של אטומים הנמצאים על המשטח, או לצפות בשינויים אנרגטיים באטומים מאותו סוג. בנוסף ניתן ע"י המערכת לבצע שינוע של אטומים בודדים ממקום למקום על פני השטח.

מערכת Atomic force microscopy (AFM)

- מיקרוסקופ כוח אטומי (AFM) הומצא בשנת 1986, והוא משמש מאז ככלי יסודי בחקר החומר במימדים ננומטריים, למטרות דימות ומדידות שונות. מיקרוסקופ זה יעיל במיוחד לחקירת פני שטח של חומרים, מוליכים ושאינים מוליכים.
- מערכת זו מכילה טיפ חד, באורך של עד 2 מיקרומטר ובקוטר קצה שיכול להיות קטן מ-20 נ"מ. הטיפ מוצב בקצהו של מכלול באורך של עד 250 מיקרומטר, שנע על פני השטח בשני צירים (X ו Y). כאשר הטיפ קרוב מספיק לפני השטח מתחילים כוחות רבים לפעול בינו לבין פני השטח, ביניהם כוחות ואן דר ואלס בין אטומיים (עיקרי), כוחות חשמליים, כוחות מגנטיים, כוחות קפילריים וכוחות קזימריים. כוחות אלה מזיזים את הטיפ וביחד איתו זז גם המכלול שמחובר אליו. בדרך כלל מקרינים קרן לייזר על המכלול, כך שכל שינוי במיקום הטיפ יגרום לקרן הלייזר לפגוע בגלאי אליו היא מוחזרת במיקומים שונים. שינויים אלו מתורגמים לשינוי גובה בפני השטח של הדגם.
- התוצאה המתקבלת לאחר סריקת פני השטח של החומר באמצעות המיקרוסקופ היא טופוגרפיה תלת ממדית של הדגם, בדיוק גבוה מאוד.

Atomic force microscopy (AFM) מערכת



How AFM Works

www.ParkAFM.com

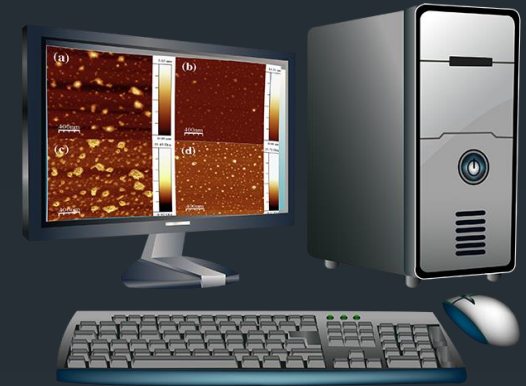
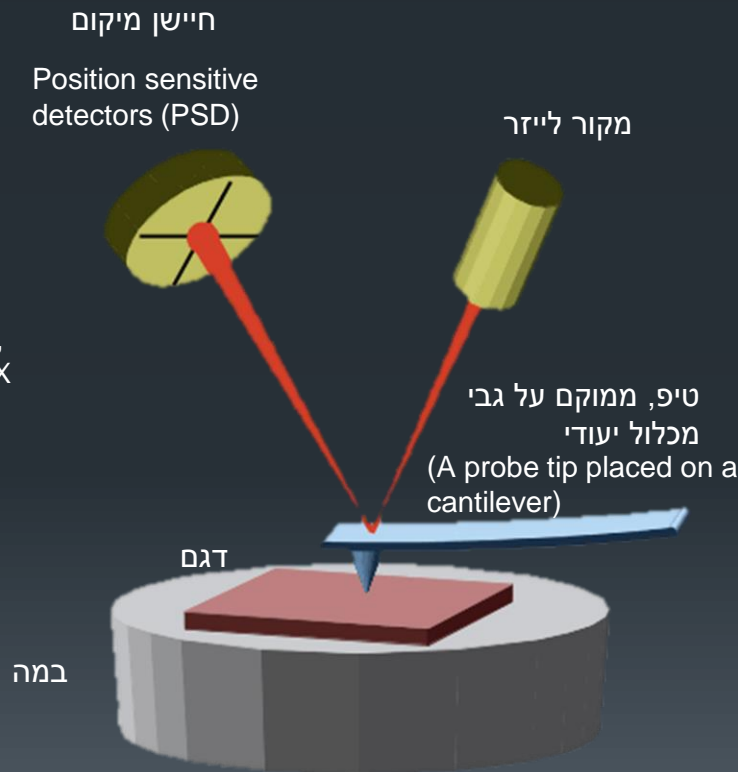
Park Systems, Inc.

מבנה כללי – מערכת SPM

מערכת ממוחשבת המניעה את הסורק והבמה, מודדת את המידע וממירה אותו לתמונה

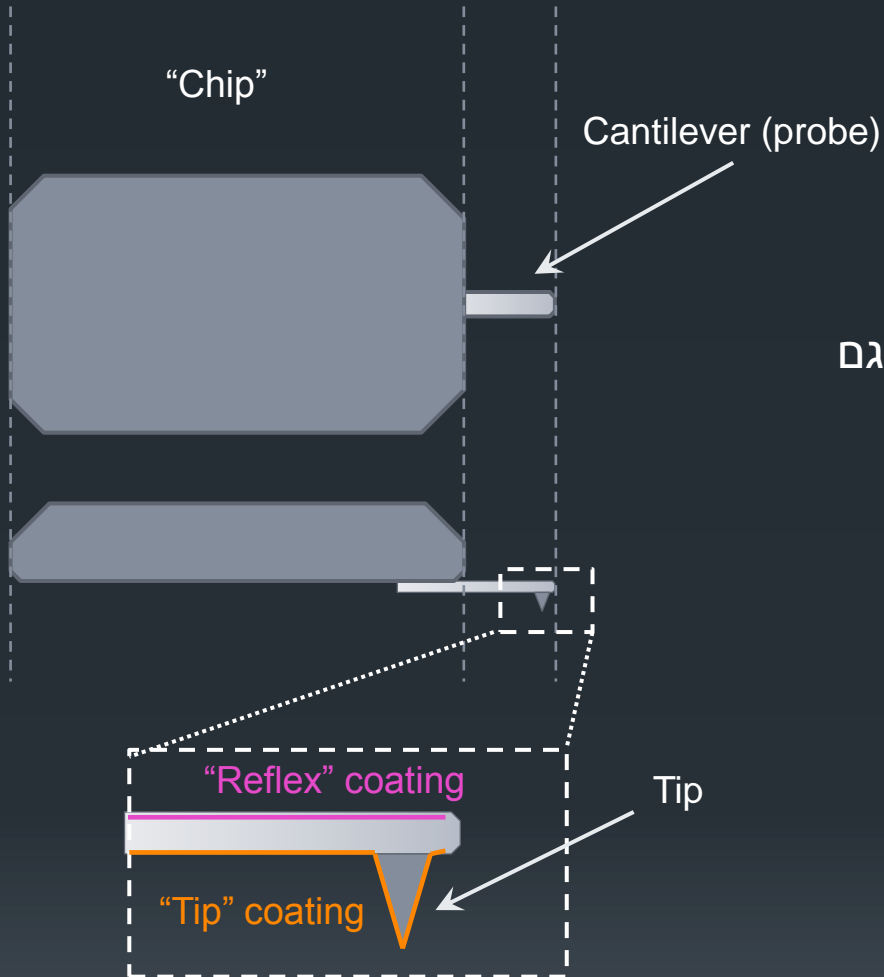
A	B
C	D

Position sensitive detectors (PSD) are optoelectronic position sensors utilizing photodiode surface resistance. Unlike discrete element detectors such as CCD, PSD provides continuous position data (X or Y coordinate data) and features high position resolution and high-speed response



מנוע לתנועה זעירה
Fine stepper motor

מכלול הטיפ



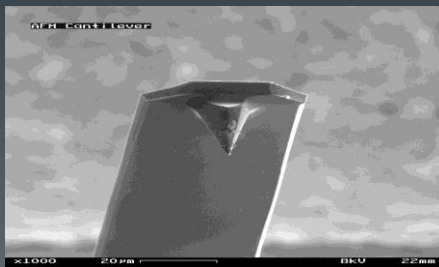
- מכלול הטיפ הינו חיישן הכח ה"מרגיש" את הדגם

- בדרך כלל מיוצר מ-Si או SiN:

- Si: טיפ חד יותר, מכלול "קשיח", תדירות גבוהה

- SiN: טיפ עמיד יותר, מכלול תואם

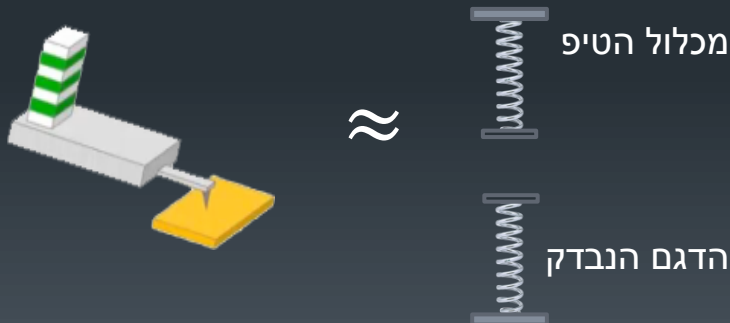
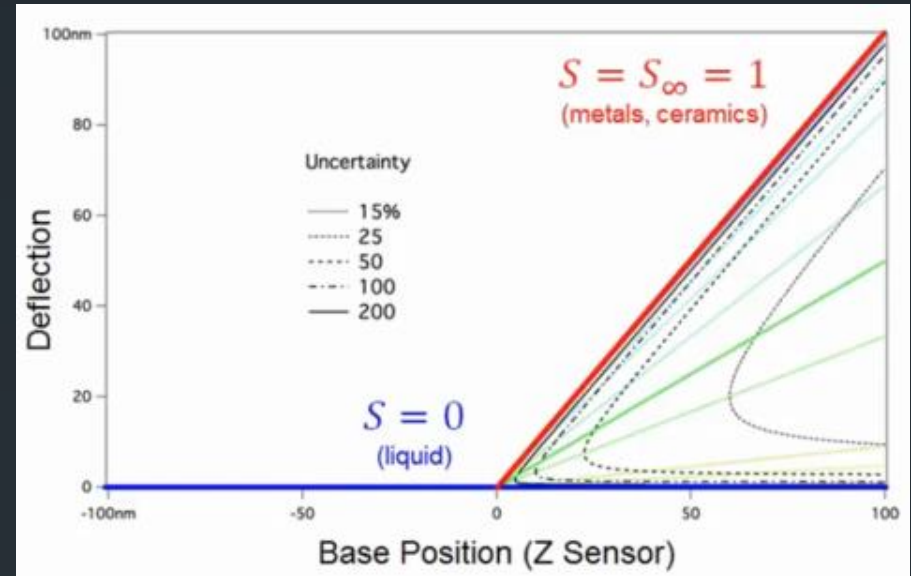
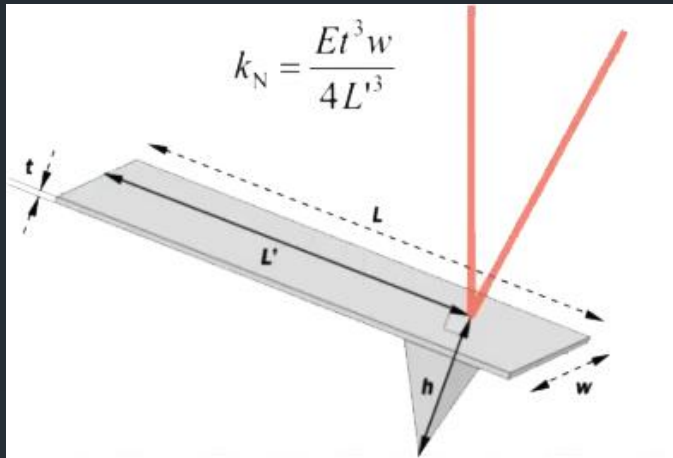
- הטיפ נשחק ומתקהה במהלך הזמן



מאפייני מכלול הטיפ

הכח המופעל לצורך הדמיה	קבוע הקפיץ	(spring constant) K_N
רזולוציית הדמיה	רדיוס קצה הטיפ (חדות)	(tip sharpness) r
מהירות הדמיה	תדר התהודה	(resonance frequency) f
מהירות הדמיה	קבוע האיכות	(Quality factor) Q

מאפייני מכלול הטיפ: קבוע קפיץ K_N



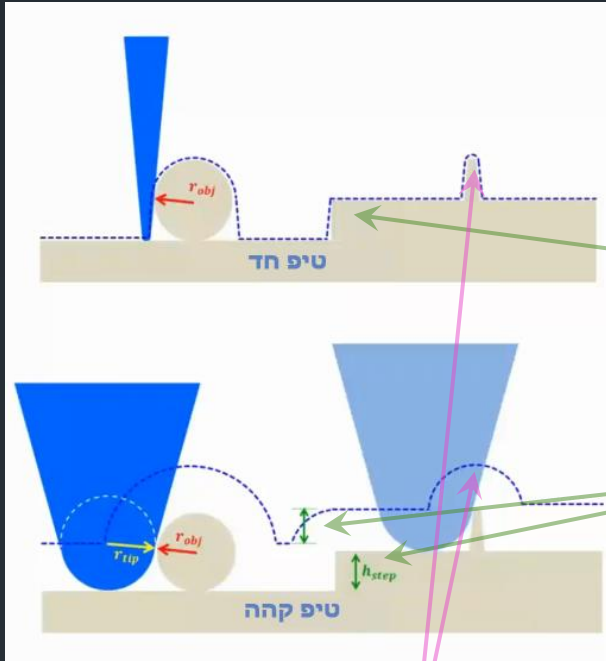
$$K_{Cantilever} \gg K_{Sample}$$

- הטיפ יחדור לדגם הנבדק ולא ישקף תמונה טופוגרפית אמינה של פני השטח (קו כחול מייצג יחס במדידה בנוזל (קבוע קפיץ נמוך מאוד של הדגם))

$$K_{Cantilever} \ll K_{Sample}$$

- הטיפ ילחץ בצורה מקסימלית באופן תמידי (קו אדום מייצג דגמים קשיחים ביותר)

רדיוס קצה הטיפ r

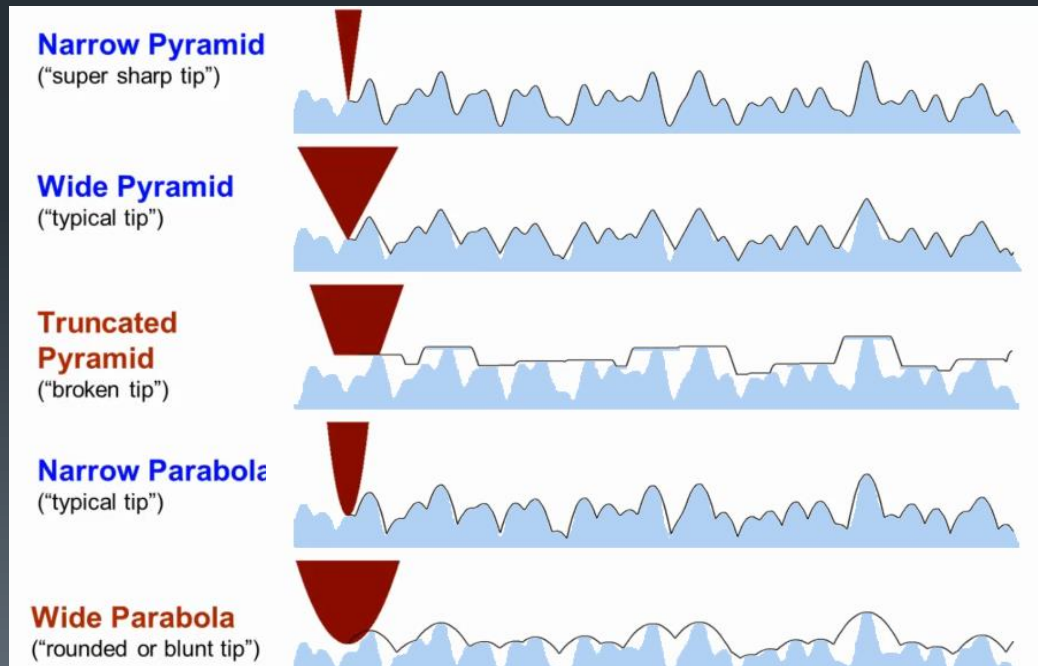


■ תמונת AFM מורכבת תמיד מהטופוגרפיה של פני השטח ומהמבנה הגיאומטרי של הטיפ

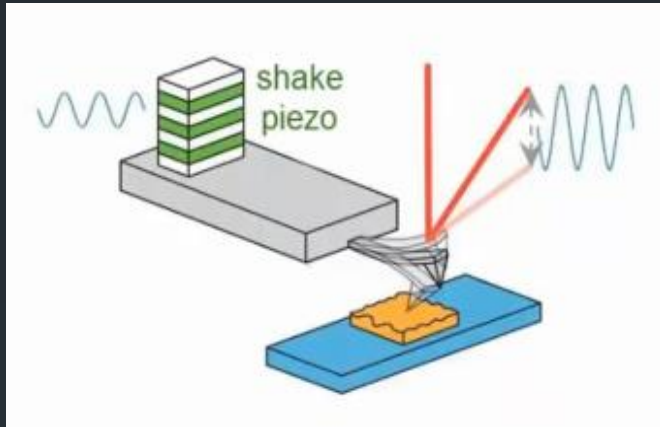
■ רזולוציית הסריקה הרוחבית (בצירים X ו Y) נקבעת ע"י המבנה הגיאומטרי של הטיפ

■ רזולוציית אנכית (בציר Z) תלויה ברגישות חיישן Z או גביש הפיאזו בציר Z ולא במבנה הטיפ

תמונת המבנה החד ביותר בפני השטח מהווה תמונת מראה של המבנה הגיאומטרי של הטיפ עצמו

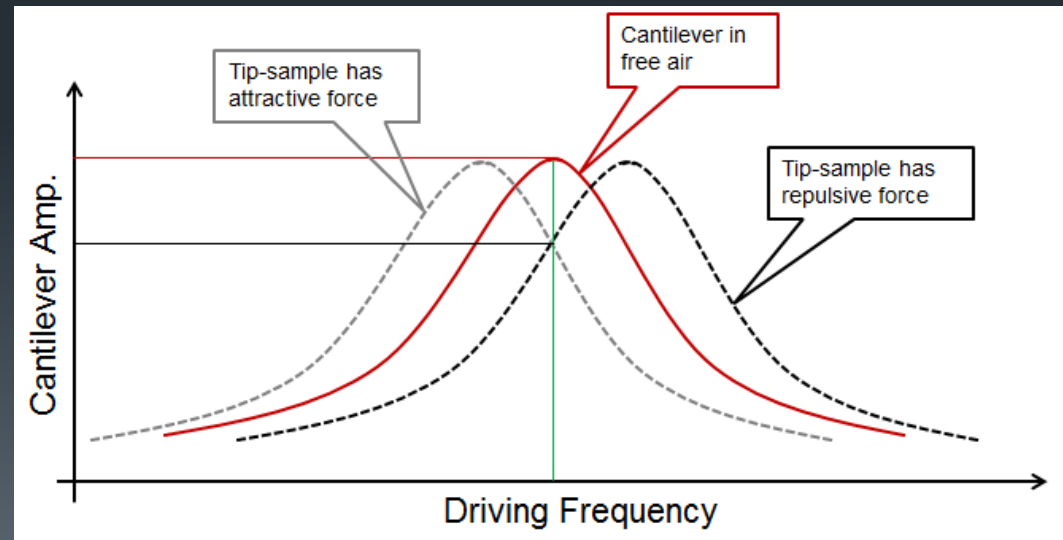
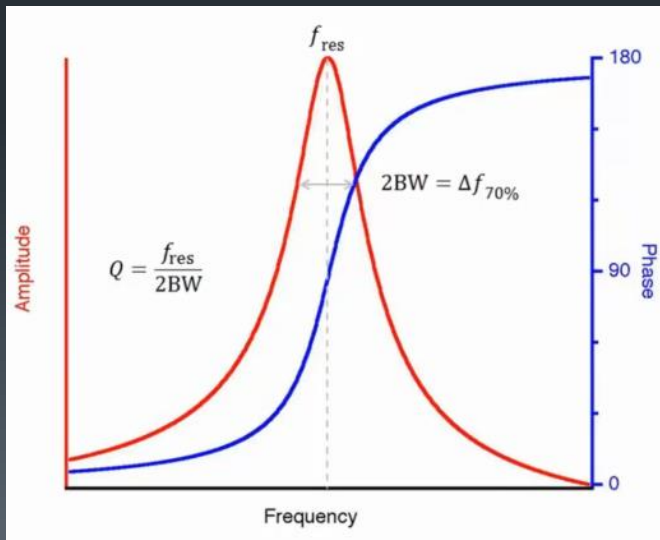


תדירות וקבוע איכות Q & f

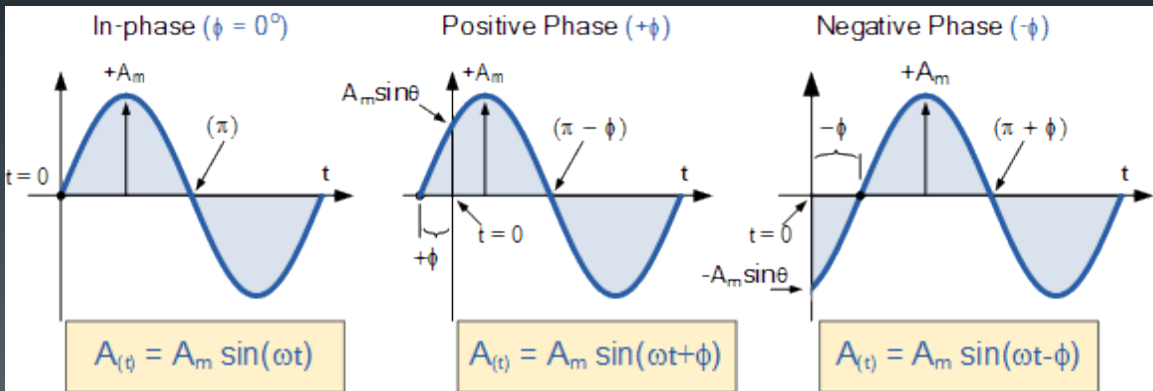
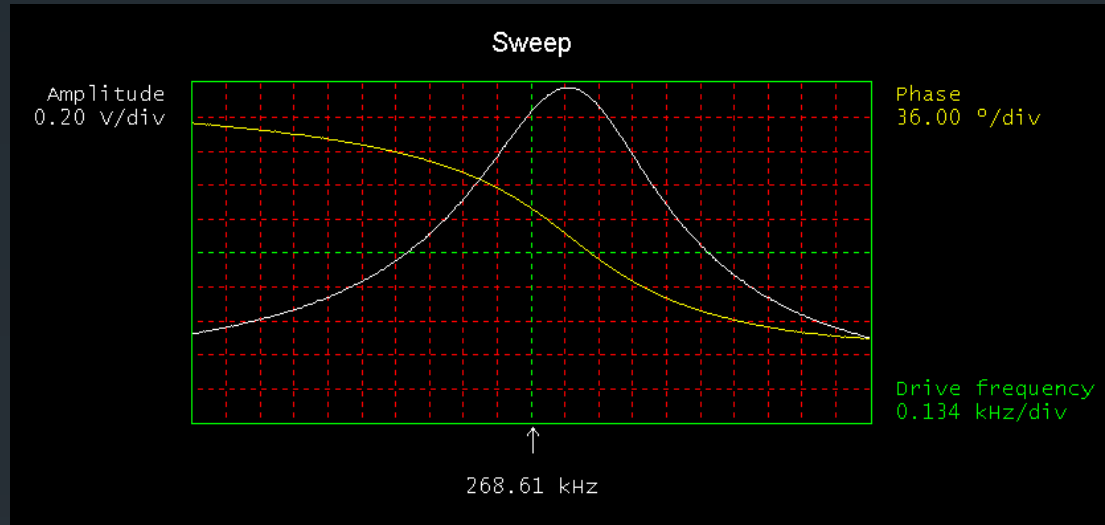
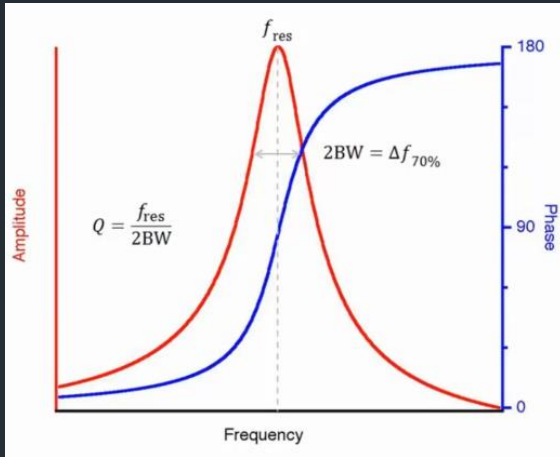


- קבועים אלו מגדירים את מהירות סריקת פני השטח של הדגם תוך שמירה על דיוק מירבי
- ב- Tapping mode

- מהירות התגובה לשינויים באמפליטודה של המכלול מגדירה את מהירות הסריקה



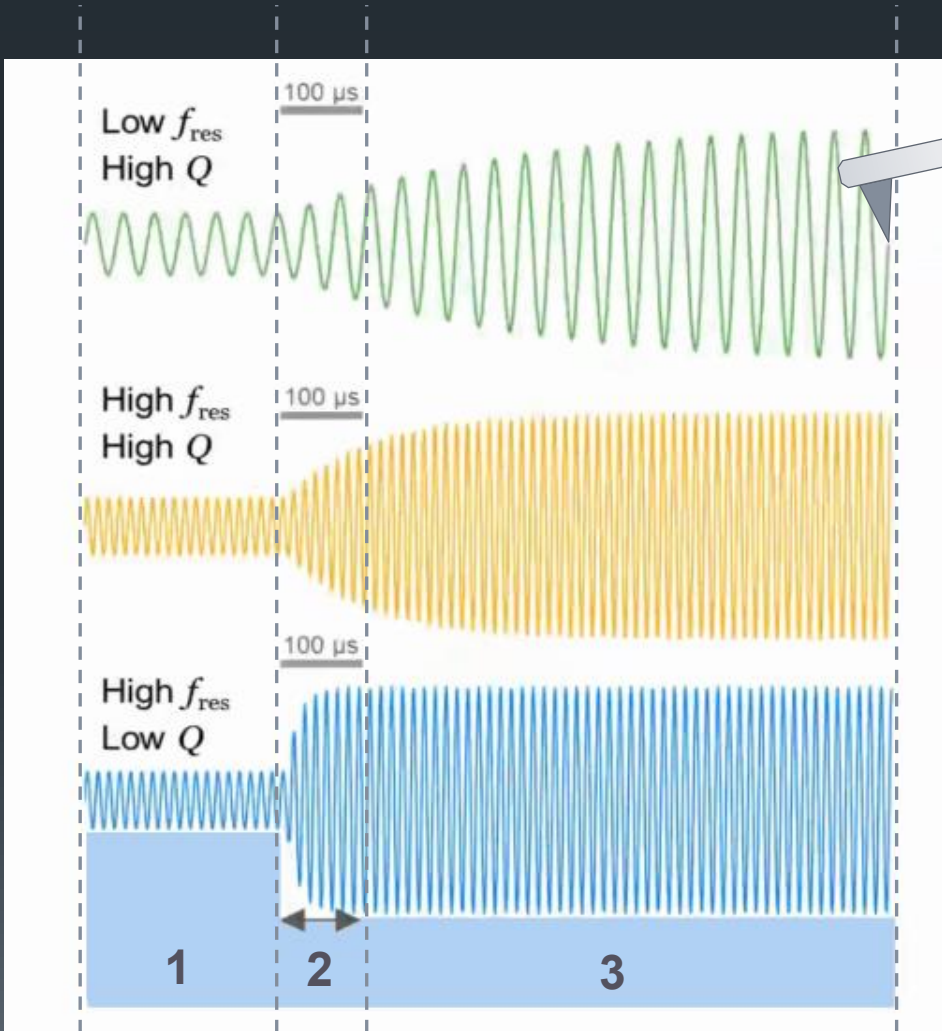
תדירות וקבוע איכות Q & f



תדר התהודה העצמי (באוויר!) נמצא בנקודה בה משרעת התנועה ינה מקסימלית ובפאזה של 90 מעלות

בד"כ תבחר תדירות העצמית לעבודה בערך נמוך יותר (ביחידת ייחוס אחת ביחס לתחום התדירויות הניתן), כיון שתדירות העבודה צריכה להתאים למצב של מגע מסויים בפני שטח

תדירות וקבוע איכות Q & f



איזור 1: משרעת התנודה של המכלול ב"שיווי משקל" מתקבלת על פני איזור שטוח בפני השטח

איזור 2: זמן תגובה (τ): הזמן שלוקח למכלול להגיע ל-70% "שיווי משקל" החדש לאחר שינוי בפני השטח

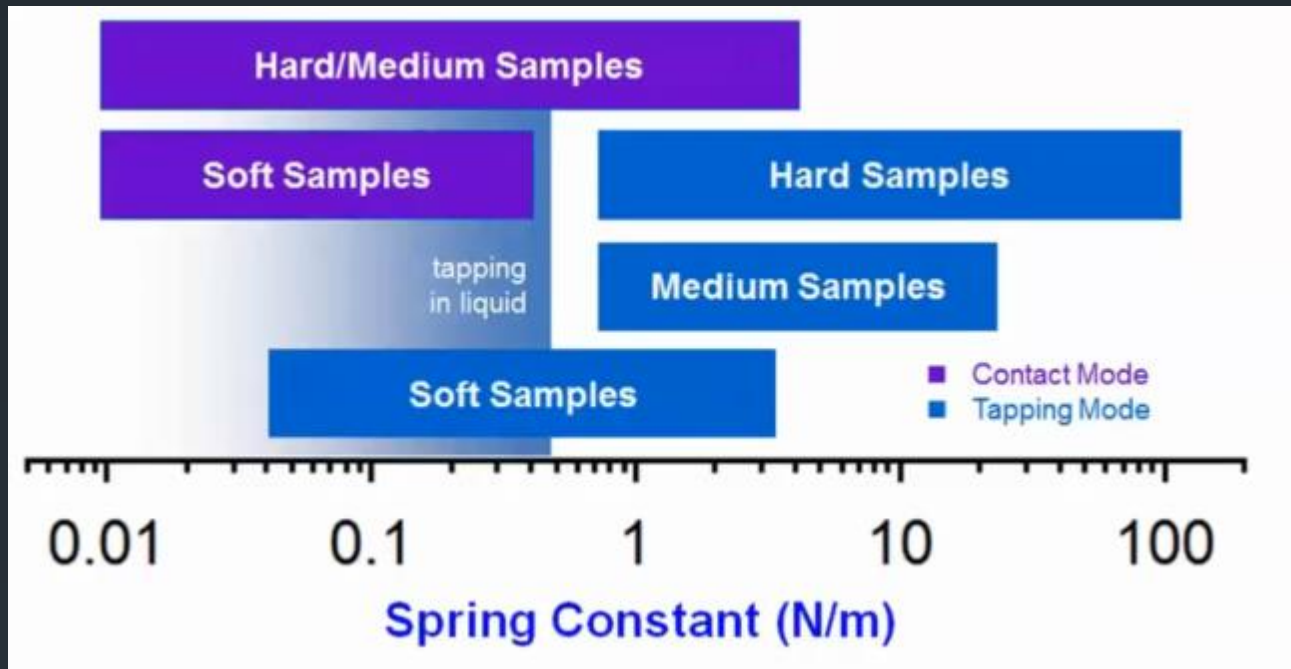
איזור 3: משרעת התנודה גדלה לאחר השינוי בפני השטח, ומתיישרת ב"שיווי משקל" חדש

- **Quality factor (Q) – קבוע איכות – מס'** המחזורים שידרשו ע"מ שהמכלול יגיע ל"שיווי משקל" בתדירות ובמשרעת
- **Resonance frequency (f_{res}) – תדר התהודה – הזמן (מהירות) שידרש למכלול להגיע ל"שיווי משקל" בתדירות ובמשרעת**

לסריקה מהירה:

- עבור אותו תדר תהודה (f), ערך קבוע איכות (Q) נמוך יותר יאפשר הגעה לשיווי משקל מהר יותר
- עבור אותו קבוע איכות (Q) בטיפים שונים, תדר תהודה (f) גבוה יותר יאפשר הגעה לשיווי משקל מהר יותר

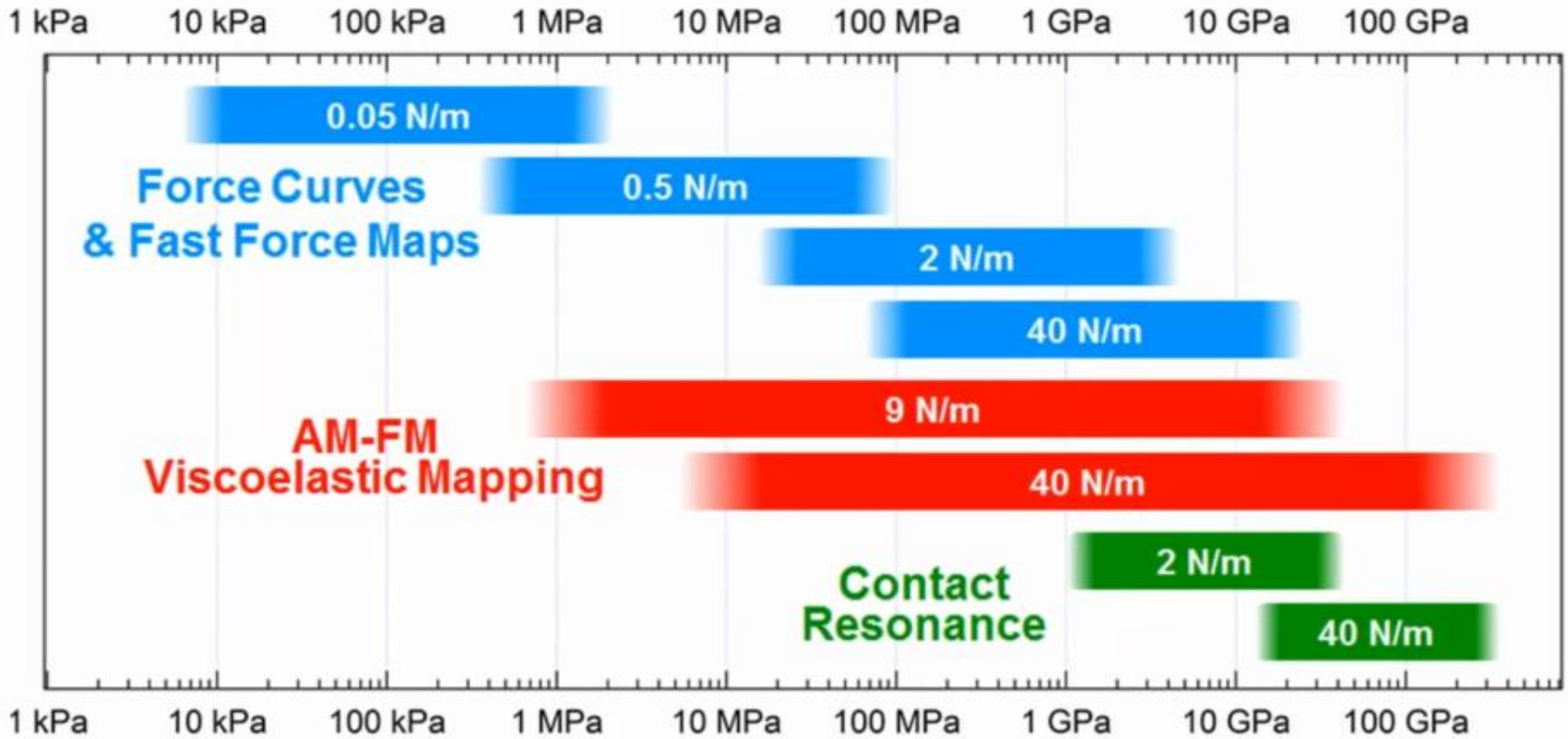
בחירת מכלול הטיפ:
קבוע קפיץ K_N



- יש לתאם בין רמת הקשיחות (קבוע הקפיץ) של מכלול הטיפ ולזו של הדגם הנבדק
- באופן כללי, בסריקה ב tapping mode יש להשתמש במכלול בעל ערך $K > \sim 0.5 N/m$ לצורך מניעת "הדבקות" של הטיפ לדגם הנבדק
- אם הדגם "דביק", יש צורך להשתמש במכלול בעל קבוע קפיץ גבוה (קשיח יותר), וההיפך להיפך

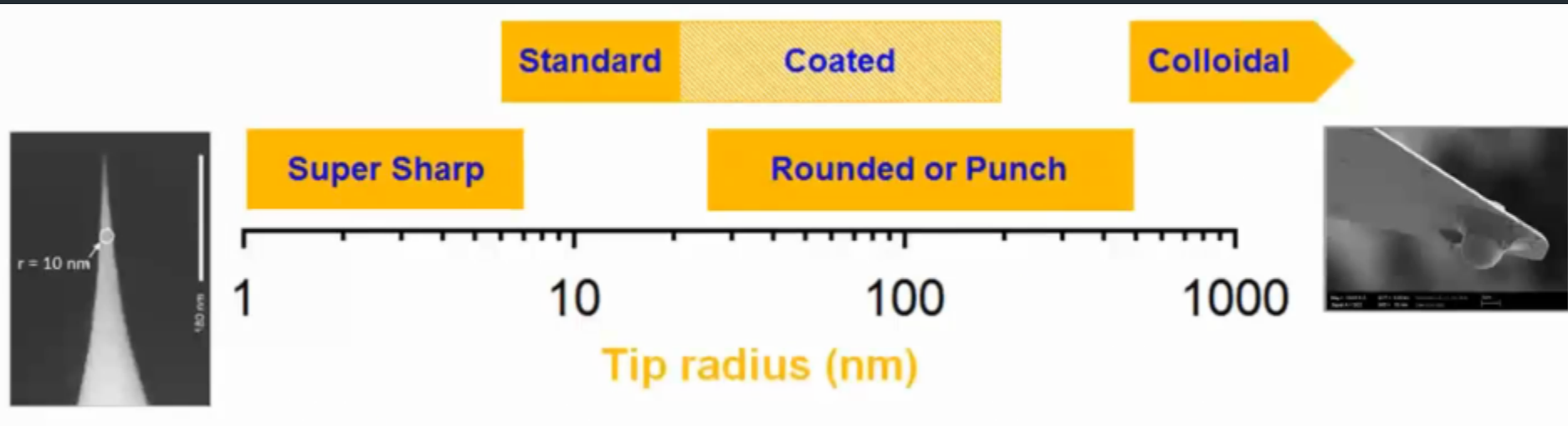
בחירת מכלול הטיפ:

קבוע קפיץ K_N



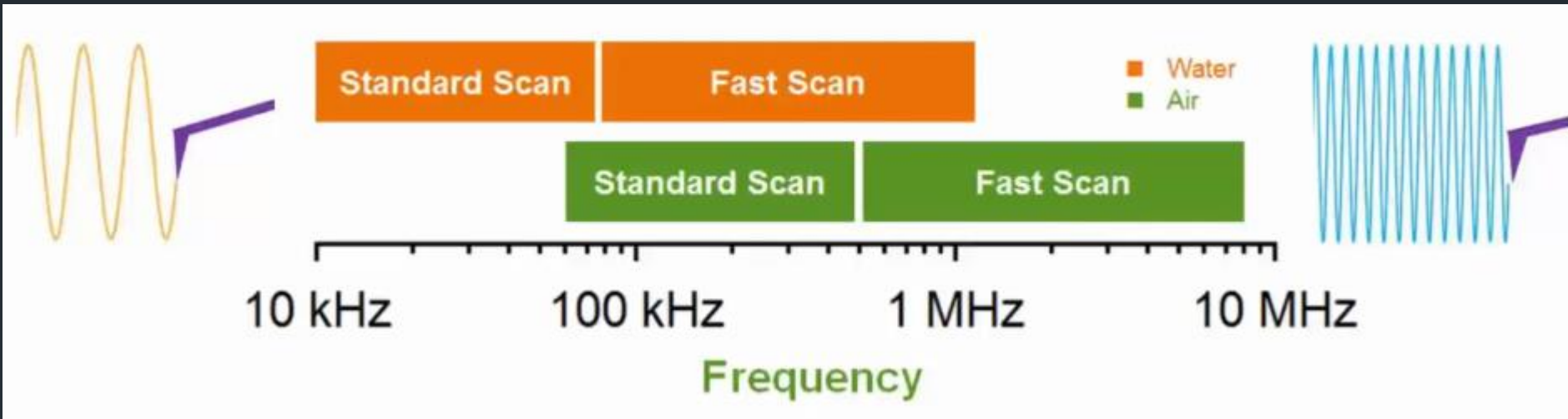
דוגמאות לערכי קבוע קפיץ של המכלול בהתאם לדגם הנבדק

רדיוס קצה הטיפ r



- רמת החדות (רדיוס קצה) של הטיפ קובעת את הרזולוציה המקסימלית של הסריקה של פני השטח
- טיפ בעל ערך $r \approx 1 - 2nm$ יקר ורצוי להשתמש בו רק במקרים מסויימים
- טיפים גדולים יותר $r > 20nm$ מתאימים יותר לסריקת דגמים ביולוגיים רכים (לדוגמא ממברנות תאים) למניעת קריעה ונזק לפני השטח של הדגם
- טיפים בעלי ערך r גבוה יותר (רדיוס גדול יותר) ובעלי "מבנה גיאומטרי ידוע" יתאים יותר לסריקת דגמי ננו-מכניקה

תדירות וקבוע איכות Q & f

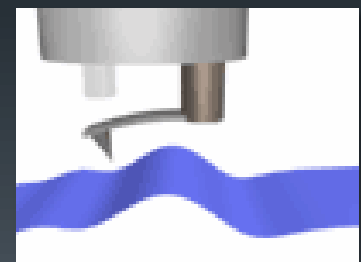
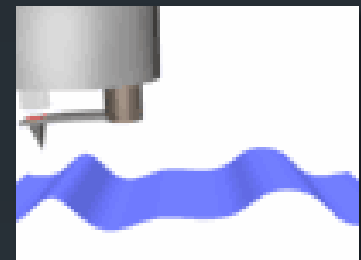
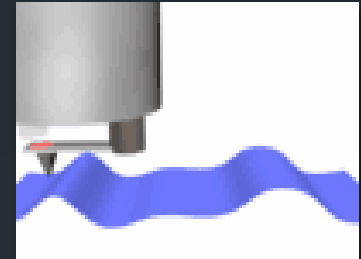


- התדירות העצמית וקבוע האיכות הם המשתנים העיקריים שיש לקחת בחשבון לצורך סריקה מהירה יותר
- רוחב הפס של המכלול ($BW = f/2Q$) מגדיר את מהירות הסריקה המקסימלית של מכלול טיפ מסויים
- מרבית יצרני מכלולי הטיפים מספקים את ערך התדירות העצמית ולא קבוע האיכות של המכלול
- ערכי התדירות העצמית וקבוע האיכות יורדים בסריקה בדגמים נוזליים (כגון תאים ביולוגיים)
- לצורך סריקה מהירה, באופן כללי יש לבחור בטיפ בעל ערך $f > 500KHz$ (בהתאם לגבלות המערכת)

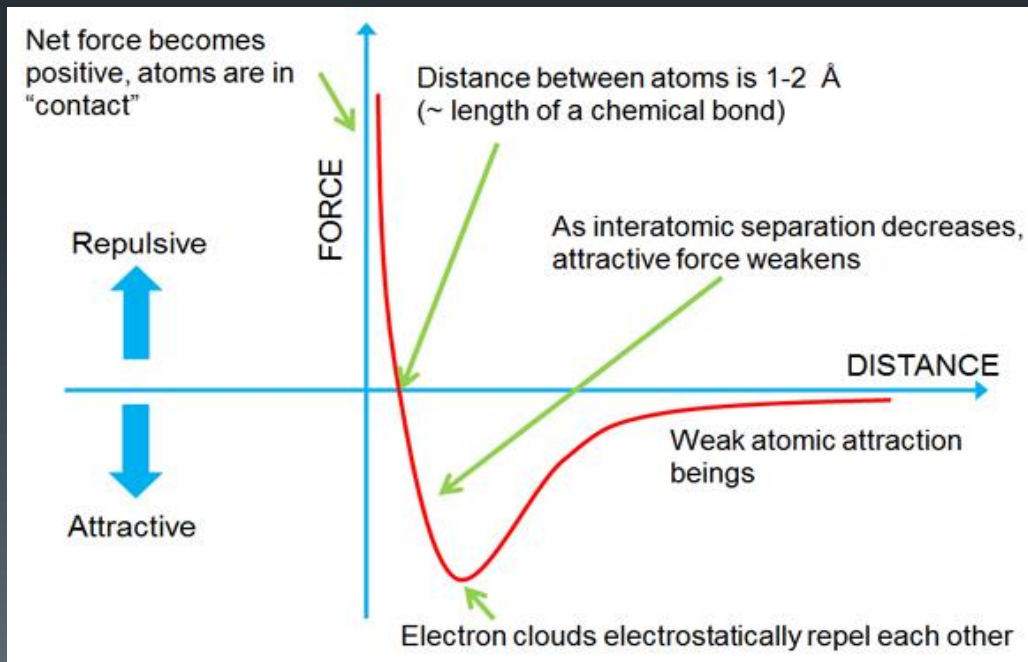
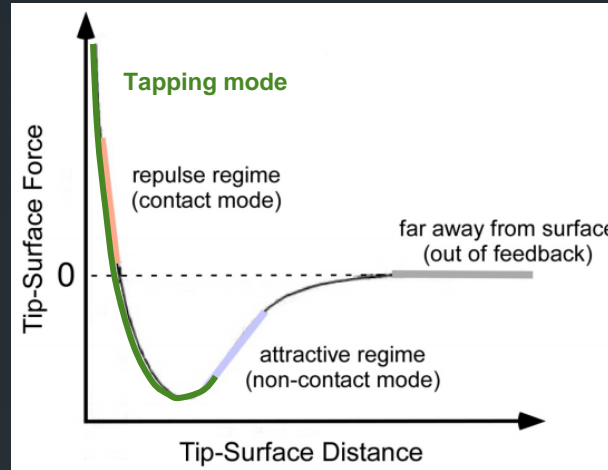
Contact mode

Non-contact mode

Tapping mode



שיטות סריקה – כוחות

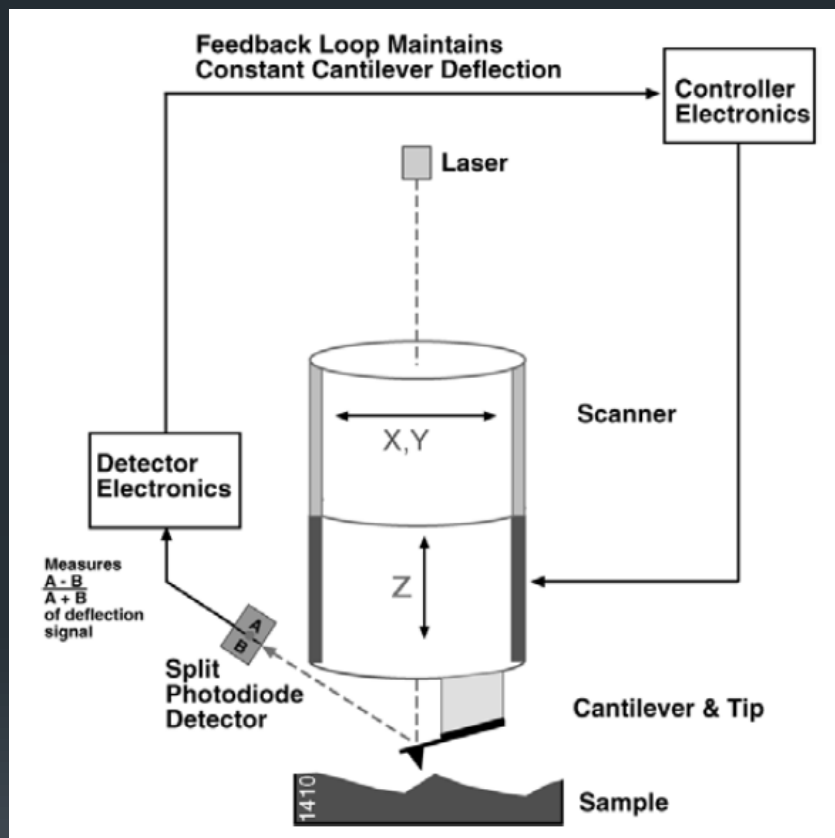


Contact mode AFM



www.parkafm.com

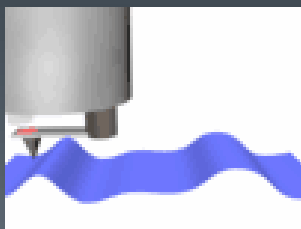
מבנה מערכת :Contact mode AFM



במצב Contact AFM מתבצעת סריקה של הדגם תוך ניטור של השינויים בהטיה של הטיפ. הטיפ נמצא ב"מגע" מלא לאורך כל הסריקה

לולאת משוב אחראית על שמירת זווית הטיה קבועה (Setpoint deflection) בין המכלול לפני השטח ע"י הזזת המכלול אנכית, מעלה ומטה בהתאמה לפני השטח

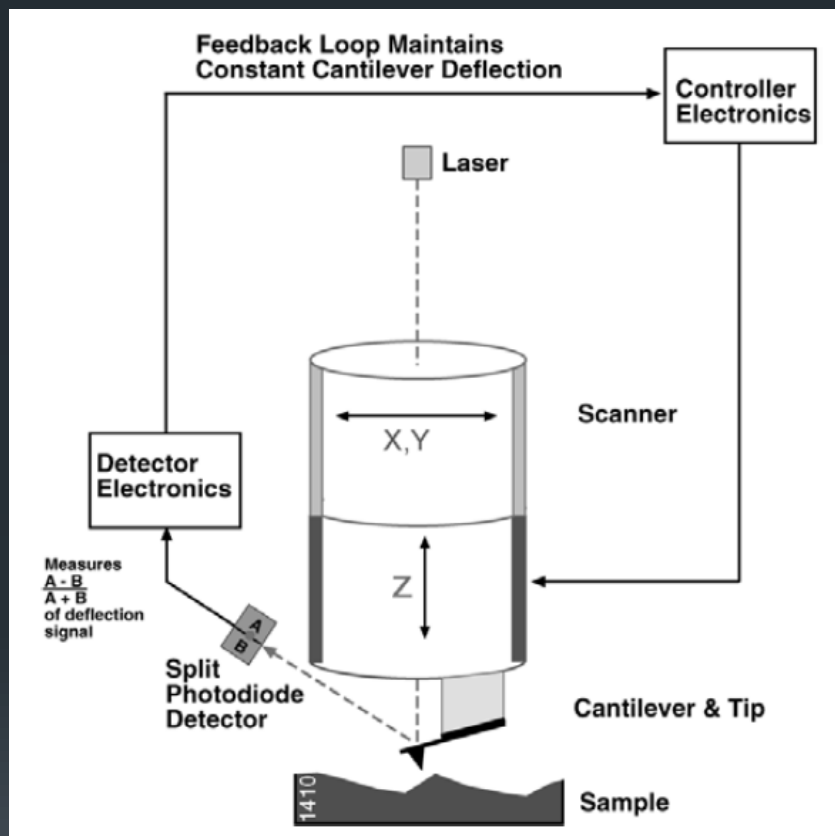
בשמירה על הטיה קבועה של המכלול תוך סריקת פני השטח, הכח שבין הטיפ לפני השטח נשאר קבוע.



Non-contact mode AFM



Non contact mode AFM מבנה מערכת



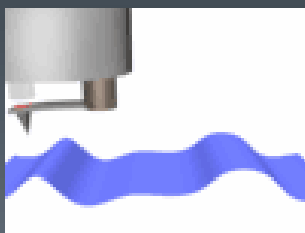
במצב Non-Contact AFM מתבצעת סריקה של הדגם תוך ניטור של השינויים בהטיה של הטיפ. הטיפ לא נמצא ב"מגע" כלל לאורך כל הסריקה אלא מתנווד מעל פני השטח

המכלול מתנווד בתדירות גבוהה יותר במעט מהתדירות העצמית שלו, בד"כ במשרעת של מס' ננומטרים בודדים (>10 נ"מ), במטרה לשמר את AC (חילופין) מהמכלול

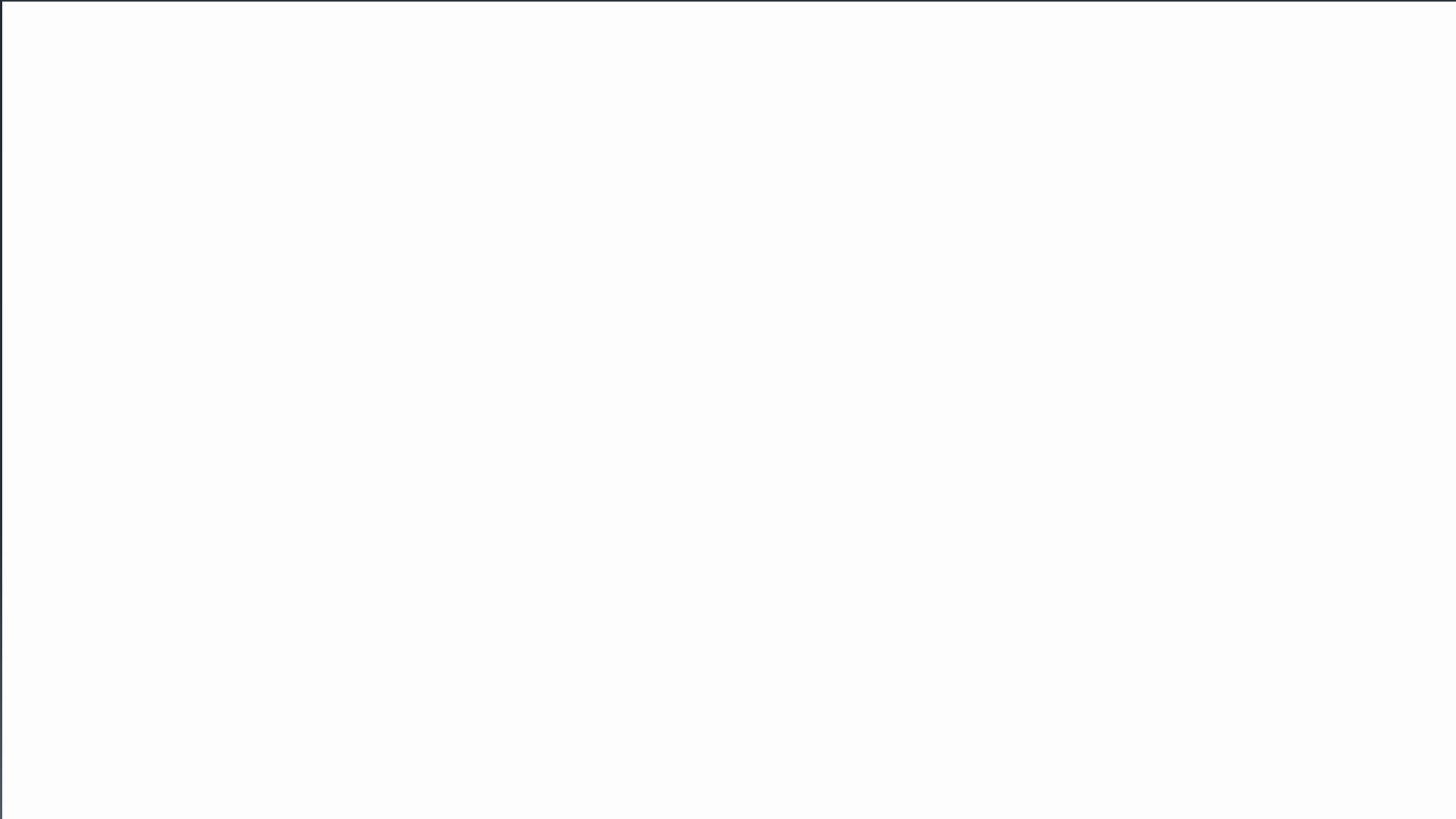
תדירות התנועה של המכלול קטנה בהשפעת כוחות ואן דר ואלס, עד לכ- 10 נ"מ מפני השטח, וכוחות נוספים במרחק זה מפני השטח. השינוי בתדירות גורם לשינוי במשרעת התנועה, ולהקטנת המשרעת בהתאמה.

לולאת משוב אחראית על שמירת תדירות או משרעת קבועה (Amplitude / Frequency setpoint) של תנודת המכלול ע"י הזזת המכלול אנכית, מעלה ומטה בהתאמה לפני השטח

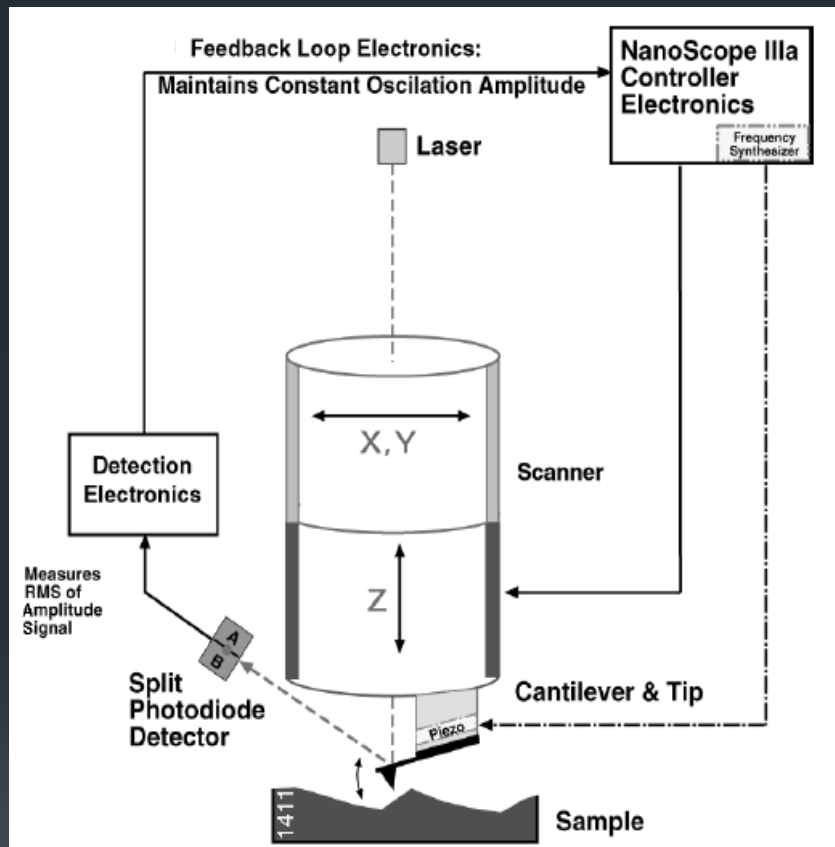
המרחק האנכי שהמערכת הניעה את המכלול בהתאם לשינוי במשרעת או התדירות ע"מ להחזיר את התנוודות המכלול לתנאים הקבועים מראש, מיוצגת כמבנה הטופוגרפי של פני השטח.



Tapping mode AFM



Tapping mode AFM מבנה מערכת



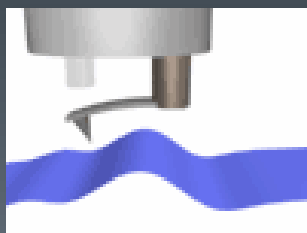
במצב Non-Contact AFM מתבצעת סריקה של הדגם תוך ניטור של השינויים בהטיה של הטיפ. הטיפ נמצא ב"מגע" רגעי לאורך כל הסריקה תוך התנוודות מעל פני השטח

המכלול מתנווד בתדירות נמוכה יותר במעט מהתדירות העצמית שלו, בד"כ במשרעת של 20-100 נ"מ. הטיפ טופח קלות על פני השטח תוך כדי סריקה, בנק' התחתונה של תנוודתו.

לולאת משוב אחראית על שמירת משרעת תנודה קבועה באמצעות שמירה על אות RMS קבוע שמתקבל מהרגש האופטי (Split photodiode detector – SPD)

המרחק האנכי שהמערכת מניעה את המכלול לצורך שמירה על משרעת תנודה קבועה, מיוצגת כמבנה הטופוגרפי של פני השטח.

אינטראקציה בין הטיפ ופני השטח נשמרת קבועה תוך כדי סריקה.



יתרונות וחסרונות

Contact mode AFM

יתרונות:

- קצב העברת נתונים מהיר ← מהירות סריקה גבוהה
- תצורת הסריקה היחידה המאפשרת לסרוק ב"רזולוציה אטומית"
- דגמים מחוספסים מאוד או בעלי שינויים קיצוניים בציר האנכי בטופוגרפית פני השטח קלים יותר לסריקה בתצורה זו

חסרונות:

- כוחות רוחביים המופעלים על הטיפ בכיוון אופקי יכולים לגרום לעיוות התמונה
- סריקה בתצורה זו יכולה לפגוע בפני השטח בדגמים רכים (לדוגמא רקמות ביולוגיות, פולימרים, סיליקון וכיוצא) ולאורך זמן גם בטיפ.

Tapping mode AFM

יתרונות:

- רזולוצית סריקה גבוהה (5-1 נ"מ לפיקסל)
- אינטראקציה קטנה של כוחות קפילריים ורוחביים בין הטיפ ופני השטח ומתוך כך אפשרות קטנה לפגיעה בפני השטח של דגמים רכים. כמו כן, פגיעה קטנה יותר בטיפ.
- אין אינטראקציה עם כוחות רוחביים לכן נמנע כמעט לחלוטין עיוות בתמונה בגללם

חסרונות:

- סריקה איטית יותר מבמצב Contact AFM

Tapping mode, Contact mode, non contact mode AFM

יתרונות וחסרונות

Non-Contact mode AFM

יתרונות:

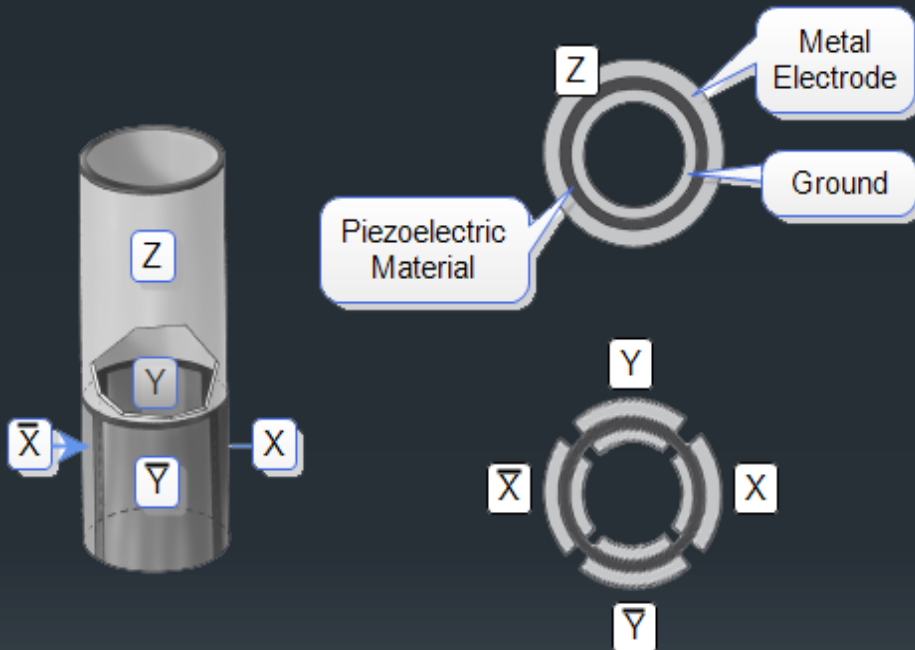
- אין כוחות הפועלים על פני השטח – מדידה ללא הרס

חסרונות:

- רזולוציה אופקית נמוכה ומוגבלת ע"י ההפרדה שבין הטיפ ופני השטח
- מהירות סריקה איטית בהרבה ביחס למהירויות סריקה במצב Contact AFM או Tapping AFM
- תצורה זו בדרך כלל מתאימה לסריקה של דגמים סופר הידרופוביים, כיוון שבפני השטח קיימות מולקולות מים מן האוויר באופן תמידי וטבעי, ואם שכבה זו של "לחות" עבה מדי, היא "תלכוד" את הטיפ ותשבש את הסריקה בצורה משמעותית

□ בגלל שחסרונות תצורת סריקה זו הם קריטיים, השימוש בתצורה זו מוגבל ביותר

סורק פיאזו-אלקטרי

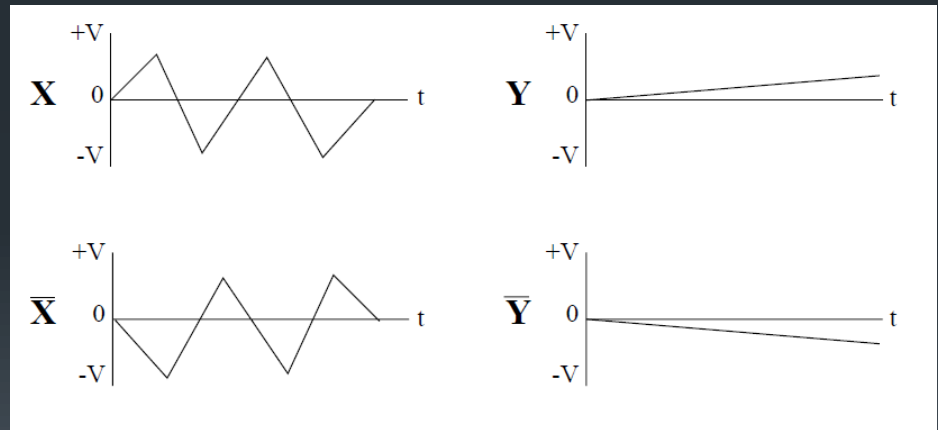


מערכות SPM מכילות סורקים לתנועה עדינה של ננו-מטרים בודדים לצורך סריקה בצירים X, Y ו Z. סורקים אלו מורכבים מחומרים פיאזו-אלקטריים המתרחבים ומתכווצים בהתאם למתח חשמלי המיושם בהם. במערכת AFM Veeco dimension 3100 מסופק מתח לסורקים הפיאזואלקטריים בטווח שבין +220 - -220 וולט, לכל ציר תנועה. הסורק בנוי משילוב של מס' פיאזו-אלקטרודות עבור הצירים X, Y ו Z במבנה גלילי יחיד, היוצרים יחד סורק בשלושה מימדים בדיוק ננומטרי. במערכות מסויימות, הסורק מניע את הדגם ביחס לטיפ הקבוע. במערכות אחרות (שלנו לדוגמא), הסורק מניע את הטיפ ביחס לדגם הקבוע.

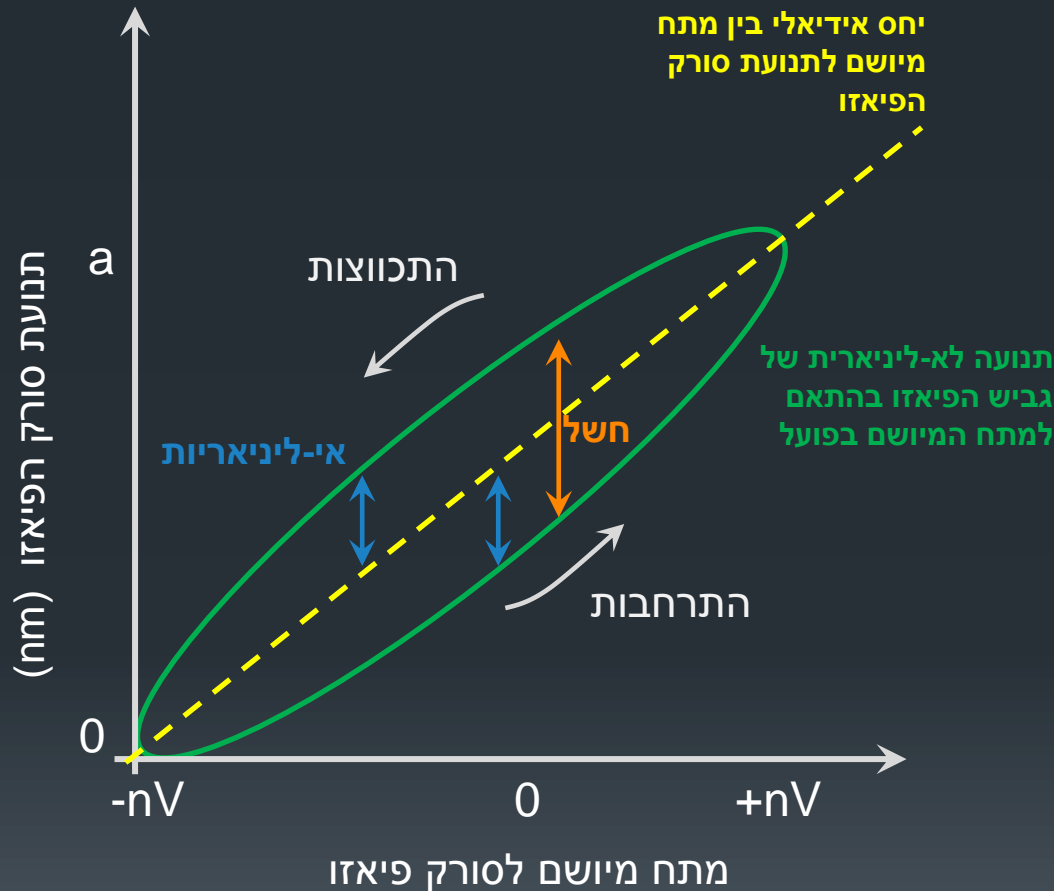
סורק פיאזו-אלקטרי



תיאור סכמטי של תנועת הסורק במהלך סריקה פשוטה לאורך צירים X ו Y.
בדוגמא זו, מתח מיושם לשני הצירים בו זמנית כמתואר בגרפים הנ"ל.



סורק פיאזו-אלקטרי: חֶשֶׁל (הִיסְטֵרֶזִיס)

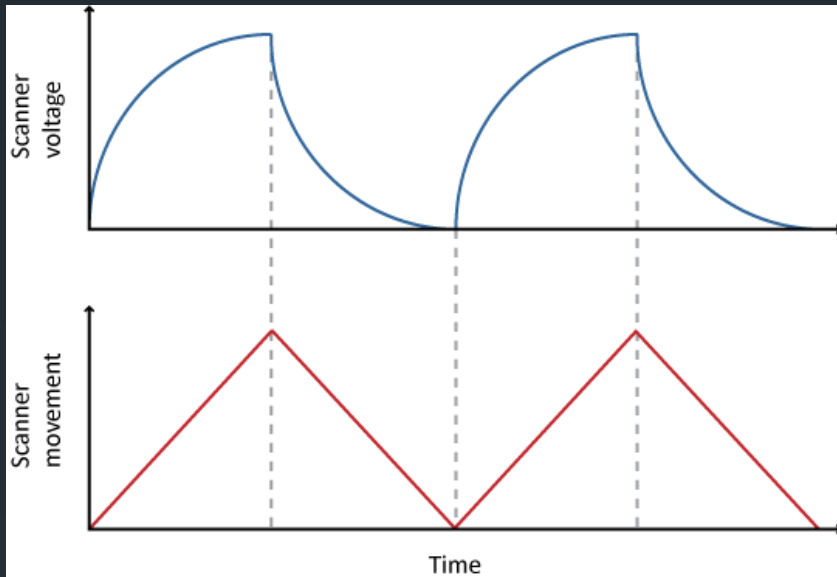


חֶשֶׁל (או הִיסְטֵרֶזִיס) היא השהייה של תגובת מערכת לעירור. בגלל שינויים בחומר ובמבנה הגיאומטרי של כל גביש פיאזו-אלקטרי בסורק הפיאזו, כל גביש מגיב בצורה שונה למתח המיושם עליו. תגובה זו מתוארת במושגים של דיוק, היחס בין המתח המיושם לתנועת סורק הפיאזו, לדוגמא: מהו מידת ההתרחבות או ההתכווצות של גביש הפיאזו ביחס למתח 1 וולט המיושם עליו.

יחס זה אינו ליניארי, לכן התנהגות גביש הפיאזו בהתרחבות או בהתכווצות שונה ומציגה את החשל (היסטרזיס) שבין שני כיווני התנועה.

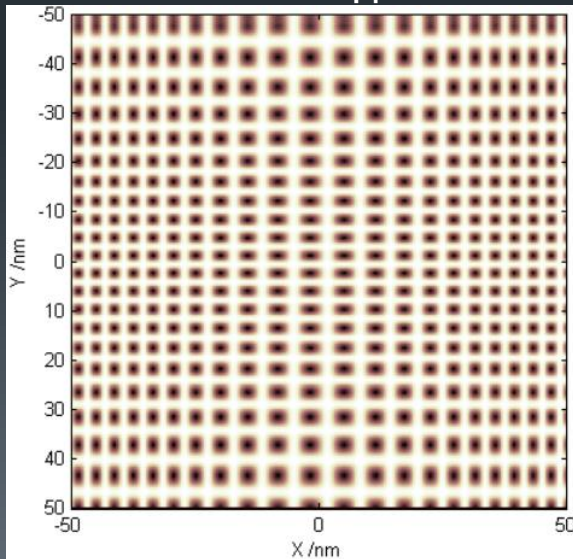
חשל זה גורם בסופו של דבר לתמונת סריקה מעוותת.

סורק פיאזו-אלקטרי: חֶשֶׁל (הִיסְטֵרֶזִיס)

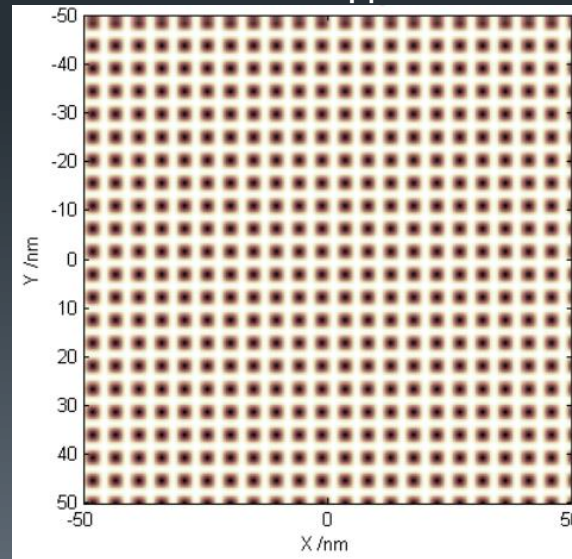


חשל זה מתוקן ע"י יישום של מתח לא-ליניארי בהתאם, כך שתנועת סורק הפיאזו בהתרחבות ובהתכווצות (במונחים של סריקה Trace-ו- Retrace) תהיה ליניארית

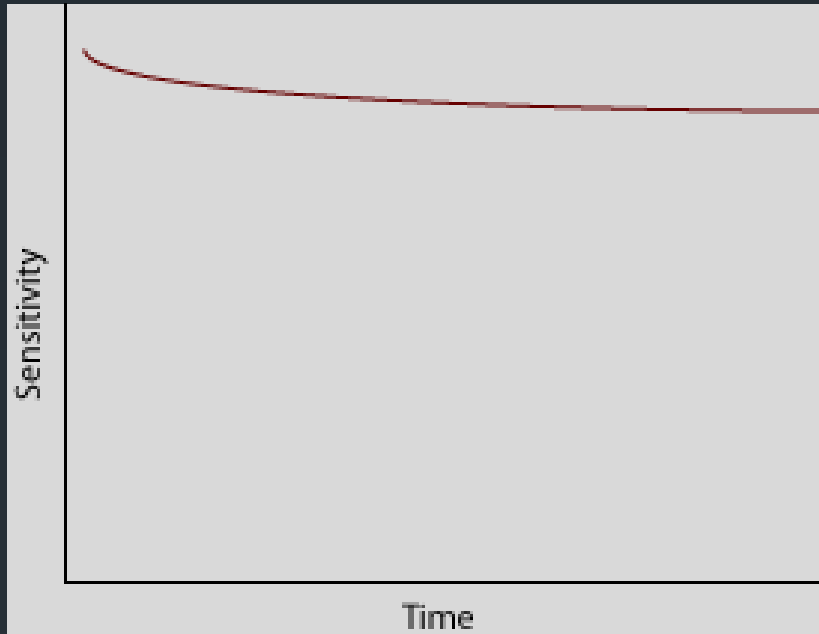
סריקה במתן מתח ללא
תיקון אי ליניאריות



סריקה במתן מתח
בתיקון אי ליניאריות



סורק פיאזו-אלקטרי: "הזדקנות"



רגישותם של חומרים פיזואלקטריים פוחתת אקספוננציאלית עם הזמן כמתואר בגרף. רוב השינוי מתרחש בתחילת חייו של סורק פיזואלקטרי ולאחר מכן השינוי קטן עד להתייצבות מסויימת. בדרך כלל, סורקים פיאזו-אלקטריים מורצים לזמן מסויים (מס' ימים ברציפות) לצורך הבאתם לתחום בו השינויי קטן עד למינימום. כך ניתן להבטיח כי בשימוש בסורקים אלו ידרש כיוול לעיתים רחוקות.

מערכת Dimension 3100:



רכיבי המערכת Dimension 3100:

- מיקרוסקופ Dimension 3100 – ראש המיקרוסקופ, הבמה ומערכת אופטית.

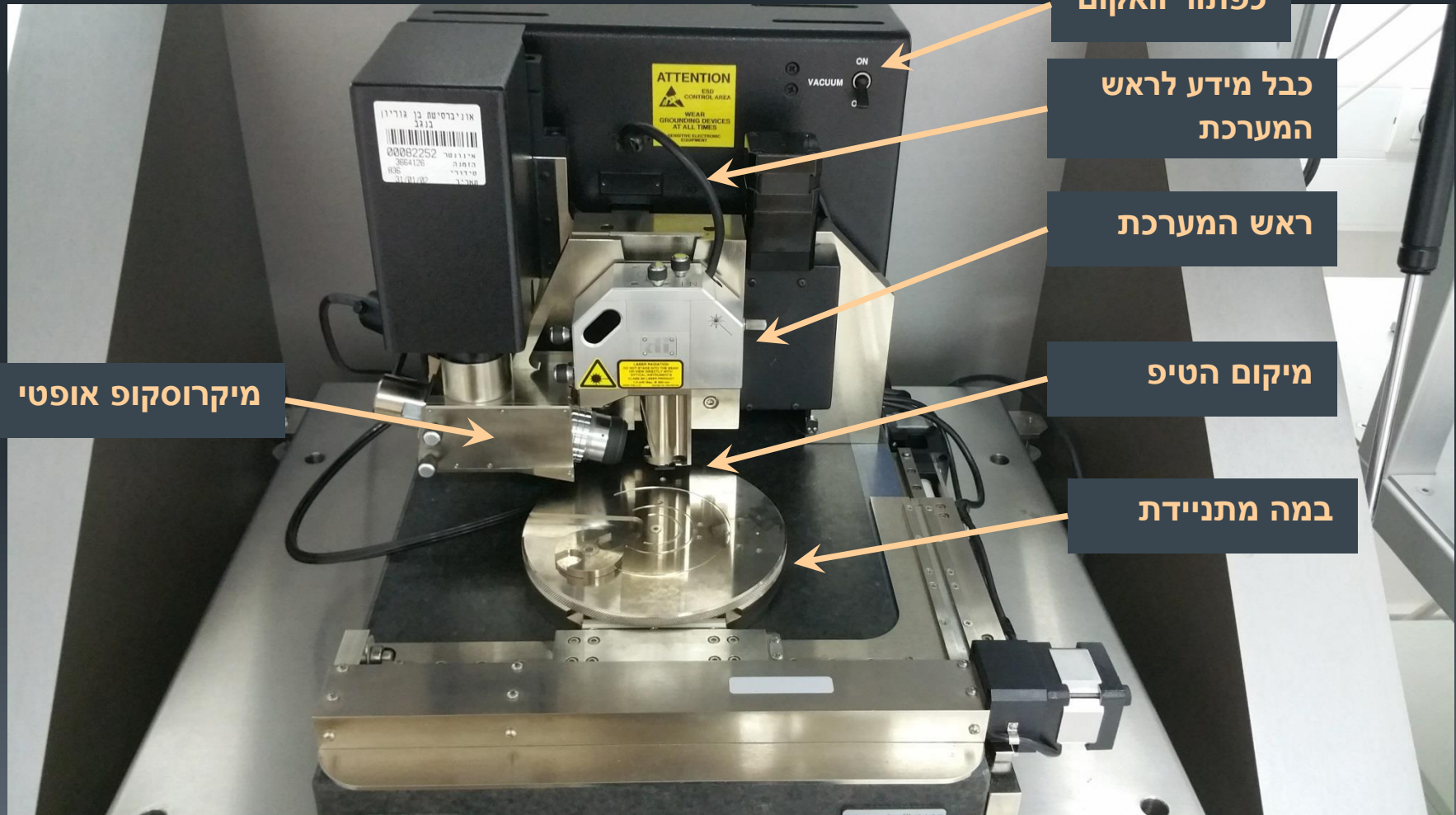
- בקר NanoScope IV – לניהול ראש המיקרוסקופ והסריקה.

- בקר NanoScope Dimension 3100 - לניהול מערכת האוויר והוואקום במערכת ומערכת ההארה.

- מחשב



מיקרוסקופ Dimension 3100



כפתור וואקום

כבל מידע לראש
המערכת

ראש המערכת

מיקום הטיפ

במה מתניידת

מיקרוסקופ אופטי

ראש המערכת

ידיות שליטה בכיוון מקור קרן הלייזר

מיקום דיודת הלייזר (בתוך הראש)

מיקום PSD (בתוך הראש)

מפצל קרן (מאחורי חלונית)

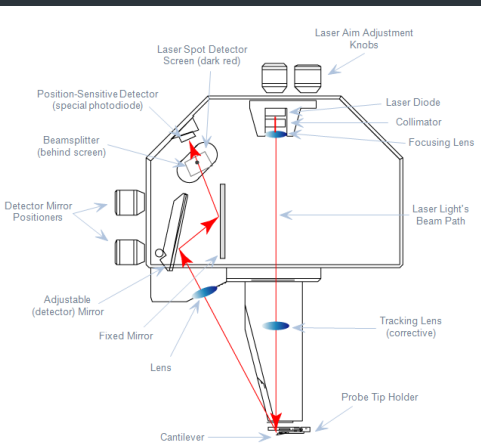
ידית שליטה בכיוון מראת הטיה לקרן הלייזר - אנכי

ידית שליטה בכיוון מראת הטיה לקרן הלייזר - אופקי

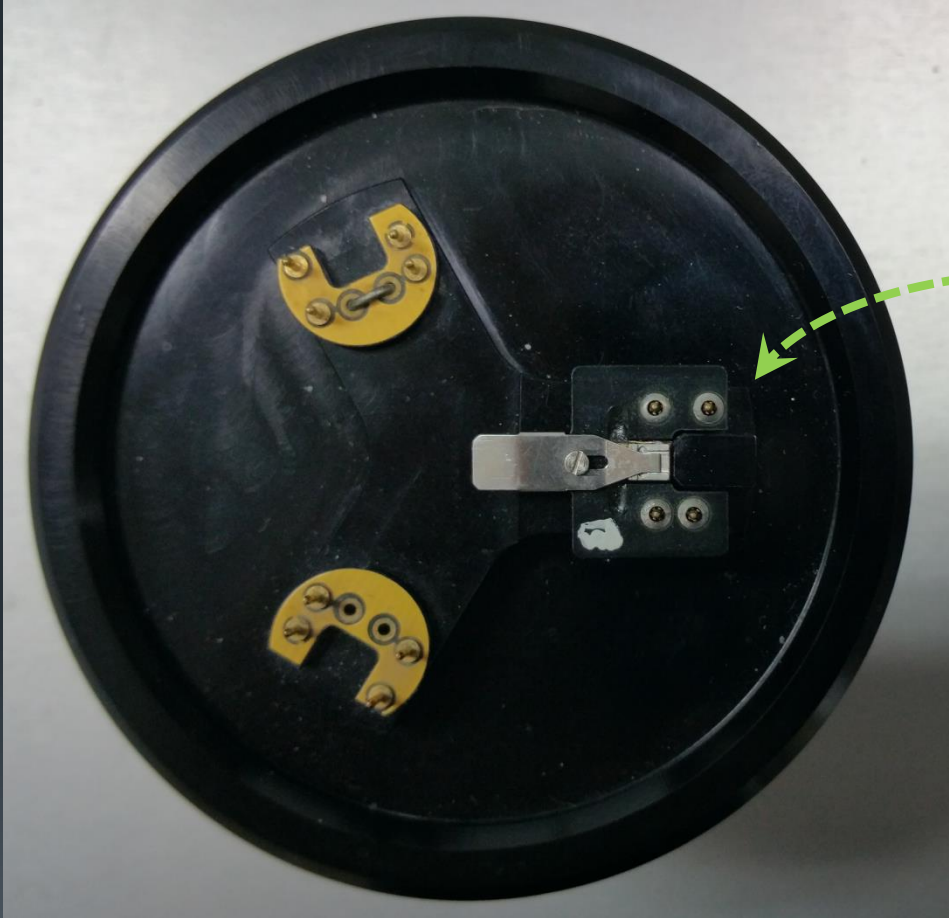
התראת לייזר פעיל

בורג חיזוק ראש המערכת במסילה היעודית

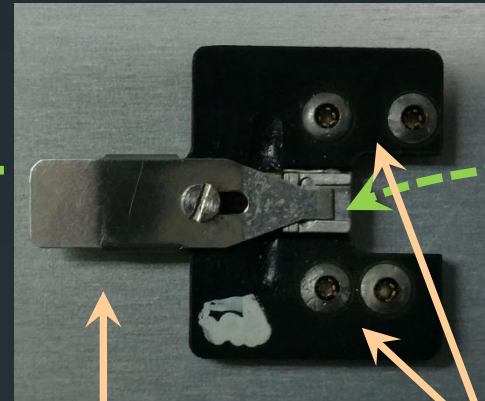
תושבת למכלול הטיפ



מחזיק מכלול הטיפ



מבט תחתי (מכיוון הטיפ)



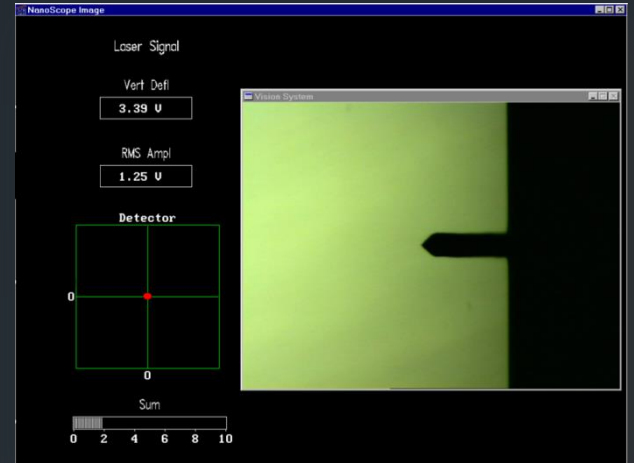
מחזיק קפיצי של מכלול הטיפ

מחברי השמה חשמליים

מעמד למחזיק טיפ סטנדרטי

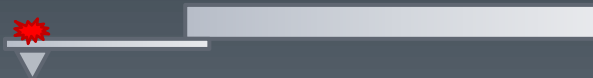


ראש המערכת – מבט עילי



המיקום הרצוי לקרן הלייזר על מכלול (Cantilever) הטיפ

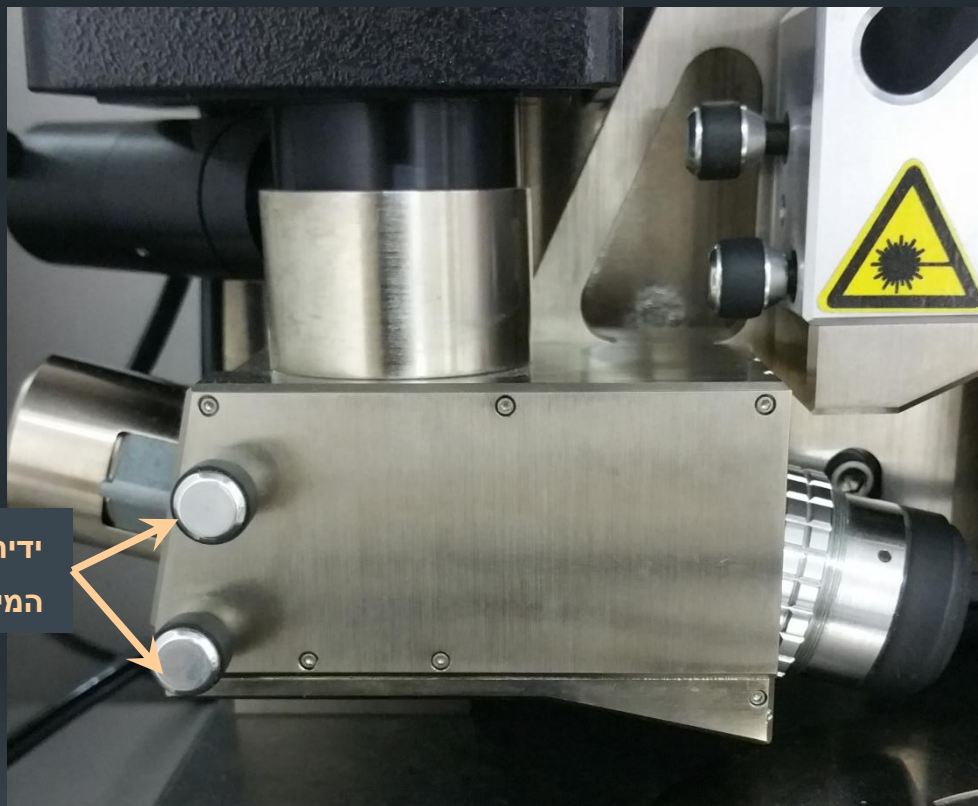
מבט צדדי



מבט עילי



מיקרוסקופ אופטי



ידית שליטה בכיוון עדשות
המיקרוסקופ האופטי



הפעלת המערכת (בסיסי):

1. הדלקת המחשב
2. הדלקת בקר NanoScope V
3. הדלקת בקר Dimension 3100
4. המתנה למעבר המערכת למצב Idle לפי מערך נורות
5. התאמת טיפ נדרש לפי הדגם למדידה ותצורת המדידה
6. בחירת תצורת סריקה במערכת
7. הצבת טיפ בראש המערכת
8. כיוון הלייזר על גבי הטיפ (אופטימיזציה של האות המתקבל מהפוטו-דיודה) ומציאת תדירות עצמית
9. מציאת הטיפ וכיוון מרכז הטיפ
10. הצבת דגם למדידה, הפעלת הוואקום המידת הצורך וכיוון הדגם לצורך סריקה באוריינטציה מקבילה לדגם
11. מציאת נק' מוקד על פני השטח של הדגם למדידה
12. קביעת פרמטרים מתאימים לסריקה ראשונית
13. מעבר למצב סריקה (Engage)
14. קביעת מהירות סריקה רצויה והגדרת פרמטרים לפי תצוגת פרופיל סריקה לצורך שיפור הסריקה
15. קביעת כוון סריקה ובחירת שמירת תמונת סריקה לפי הצורך
16. התחלת סריקה

כיבוי המערכת (בסיסי):

1. סיום סריקה
2. מעבר למצב ניתוק מהדגם (Disengage)
3. הרחקת ראש המערכת לגובה של לפחות 1.5 ס"מ מהדגם הנמדד
4. כיבוי וואקום והוצאת הדגם
5. הוצאת הטיפ והחזרתו למקום
6. כיבוי Dimension 3100
7. כיבוי NanoScope V
8. כיבוי מחשב