

מיקרוסקופ מינהור סורק ומיקרוסקופ כוח אטומי

יוחנן מרגונינסקי, מכון רקח לפיסיקה, האוניברסיטה העברית, ירושלים

תקציר

לשני המיקרוסקופים הידועים מכבר, האופטי והאלקטרוני, נתווספו מאז תחילת שנות השמונים שני מכשירים חדשים: מיקרוסקופ מינהור סורק ומיקרוסקופ כוח אטומי. שניהם מגיעים באופן שגורתי לכושר הפרדה אטומי, פועלים ללא מערכת ואקוואום ופועלים אפילו על דגמים מכוסים בנוזל. המאמר מסביר את עקרון פעולתם ומביא דוגמאות לשימוש בהם במחקרים בפיזיקה, בכימיה ובביולוגיה.

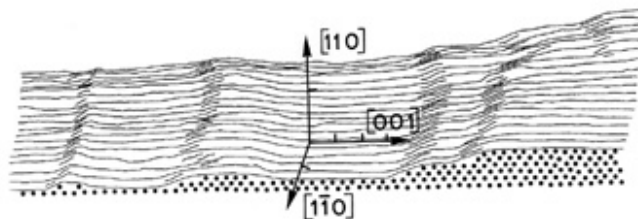
מילות מפתח:

מיקרוסקופ מינהור סורק, מיקרוסקופ כח אטומי.

[מיקרוסקופ הכח האטומי](#)

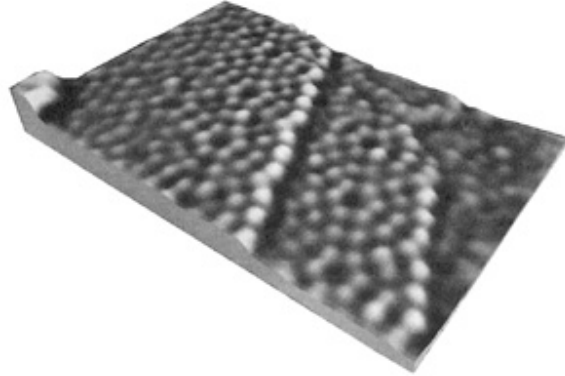
[רשימת המקורות](#)

ביולי 1982 הופיעה בעיתון המדעי Physical Review Letters תמונה, שהיום אפשר לכתותה תמונה הסטורית (תרשים 1). התמונה היא תאור טופוגרפי של פני זהב. והיוצא דופן בה הוא גודלו של השטח המתואר 2.5×50 ננומטרים בו בבירור מדרגות שגובהן כ-5 ננומטרים: טופוגרפיה בקנה מידה אטומי ובכושר הפרדה הגדול בסדרי גודל מזה של המיקרוסקופ האלקטרוני הסורק. התמונה התקבלה בעזרת מכשיר הנקרא "מיקרוסקופ-מינהור סורק (ממ"ס) (Microscope, STM Tunneling Scanning). ממציאיו הם ג. ביניג וה. רוור (G. Binnig, H. Rohrer) ממעבדת המחקר של חברת המחשבים י.ב.מ. בציריך, שויצריה, שזכו בשנת 1986 בפרס נובל לפיסיקה.



תרשים 1. תמונה של פני זהב, שנתקבלה בממ"ס. הצירים מסמנים את הכיוונים הגבישיים, קווי החלוקה עליהם מרוחקים ≈ 10 זה מזה. הנקודות מציינות את המקום המשוער של אטומי-זהב (מתוך (2) ברשימת המקורות).

the figure is reprinted from: G. Binnig et al., Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy, fig 3b, Phys. Rev. Letters, 49, 1, 1982, with the kind permission of the authors and the American Physical Society



תרשים 2. פני צורן בכיוון גבישי (111), כל עגול בהיר מסמן מקומו של אטום. באמצע התמונה מדרגה בגובה של אטום (מתוך 3) ברשימת המקורות).

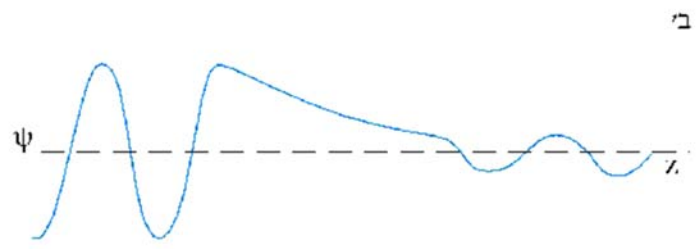
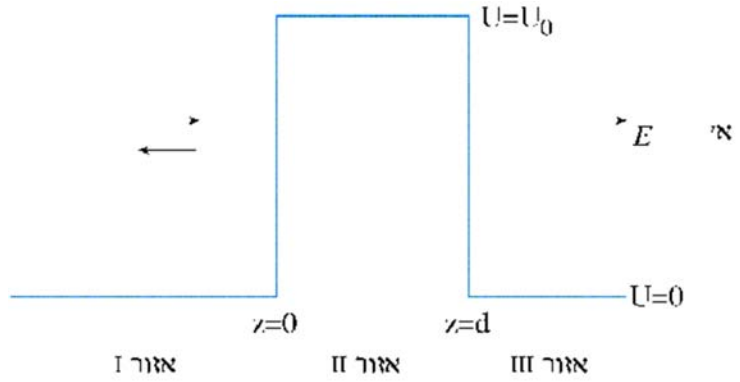
J. Tersoff, Scanning tunneling microscopy, fig 19, J. Appl. Physics, 61, 2, pp.R1 - R23, (1987) & the figure is reprinted from: P.K. Hansma with the kind permission of the authors and the American Institute of Physics

בתרשים 1 עדיין אין מבחינים באטומים בודדים של זהב, אך בהמשך פיתוח הממ"ס הגיעו באופן שגרתי לכושר הפרדה אטומי. בתרשים 2, המתאר פני צורן, מקומו של כל אטום נראה בבירור, והמדרגה במרכז התמונה בולטת לעין.

בניגוד למיקרוסקופים האופטיים והאלקטרוניים, אין בממ"ס עדשות ואין קרניים, העוברות תהליכי שבירה, התאבכות או נפיצה. עקרון פעולתו הוא מינהור (tunneling) של חלקיקים קוונטיים, כלומר היכולת של חלקיקים אלה להתגבר על מחסום פוטנציאל על-ידי חדירה דרכו, ולא על-ידי מעבר מעליו. במכניקה הקלאסית משוואת התנועה של אלקטרון (בעל מסה m , תנע $p(z)$ ואנרגיה E) הנע לאורך ציר z באזור בעל פוטנציאל $U(z)$ היא:

$$\frac{p^2(z)}{2m} + U(z) = E \quad (1)$$

אלקטרון קלאסי מסוגל לנוע רק באזורים לגביהם $U(z) < E$ והאזורים $U(z) > E$ הם "מחוץ לתחום" ומהווים עבור האלקטרון מחסום פוטנציאל בלתי חדיר. לא כך במכניקת הקוונטים, הנותנת לאלקטרון סיכוי מסויים להימצא באזור $U(z) > E$. נניח שגובה מחסום הפוטנציאל הוא U_0 ועוביו d (תרשים 3א'). נחלק את המרחב לשלושה אזורים: I לפני המחסום, אזור II בתוכו ו-III אחרי המחסום. תרשים 3ב' מתאר את פונקציית הגל $\psi(z)$ של האלקטרון (הפיתרון למשוואת שרדינגר) בשלושת האזורים.



תרשים 3

א. מחסום פוטנציאל בגובה U_0 ועובי d .

ב. החלק הממשי של פונקציית הגל של אלקטרון בשלושת האזורים של המחסום.

באזור I נתונה $\psi(z)$ על-ידי סכום של שני גלים הרמוניים, אחד נע אל המחסום והשני מוחזר ממנו:

$$\psi(z) = A \exp(ikz) + B \exp(-ikz); \quad k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \quad (2)$$

אחרי המחסום, באזור III, $\psi(z)$ הוא גל הרמוני המתרחק מן המחסום: $\psi(z) = D \exp(ikz)$, A, B, D ו- C (במשוואות 2 ו-3) הם קבועים הנקבעים על-ידי תנאי השפה.

אותנו מעניין במיוחד הפיתרון בתוך המחסום, שם $U(z) = U_0$ (אזור II); $\psi(z)$ הוא:

$$\psi(z) = C \exp(-k'z); \quad k' = \frac{\sqrt{2m(U_0 - E)}}{\hbar} \quad (3)$$

למקרה של מיקרוסקופ מינהור סורק - נניח שהאזורים I

ו-III מיוצגים על-ידי שני לוחות מתכת של קבל לוחות שהמרחק ביניהם הוא d (תרשים 3). $E < U_0$ בנוסחה (3) מייצגת את פונקציית העבודה של המתכת (האנרגיה המינימלית הדרושה להוצאת אלקטרון מפני המתכת).

אם נניח שערכה של פונקציית העבודה הוא eV_5 אזי תרד, בנתונים אלה, $\psi(z)$ ל 37% מערכה המקורי לאחר חדירה של $\frac{1}{2}$ בלבד לתוך המחסום. זאת אומרת, מדובר בחדירה במימדים אטומיים.

מינהור האלקטרונים משני לוחות הקבל מתקיים בשני הכיוונים במידה שווה; זרם נטו לא יזרום. לקבלת זרם יש לחבר מקור מתח V בין שני הלוחות.

כל המסקנות האלה תקפות גם אם לוח הקבל של איזור I הוא הדגם המתכתי הנסרק ואם נחליף את לוח הקבל של איזור 3 בחוד מתכתי זעיר. החוד רק ירכז את זרם המינהור לסביבתו.

אם המתח המופעל V קטן כך שמתקיים: $eV > E - eU$, זרם המינהור (שכיוונו מוגדר ככיוון תנועת אלקטרונים המינהור) מתכונתי למתח המופעל V , ויורד אקספוננציאלית עם המרחק d בין פני המתכת לבין החוד:

$$I(d) \propto \exp(-2k'd) \quad (4)$$

עבור d של כמה אנגסטרומים זרם המינהור הוא

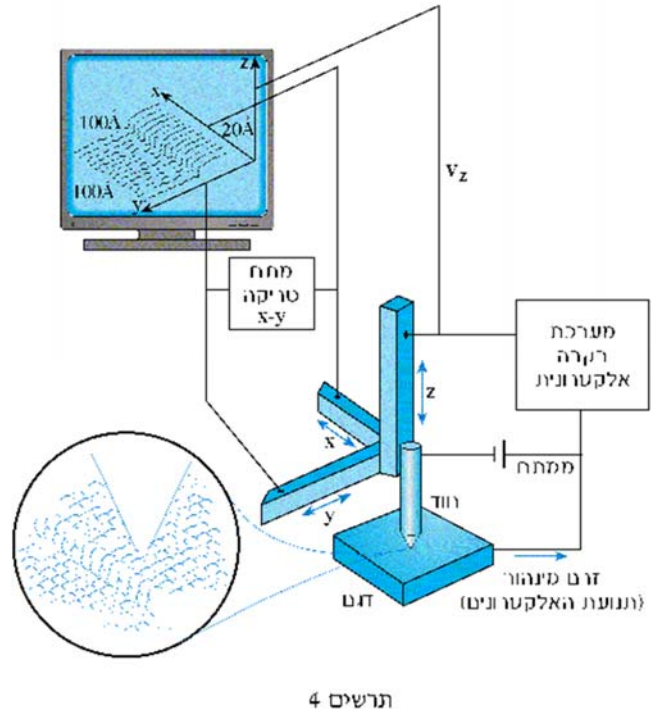
הגורם השולט ב- (4) הוא כמובן התלות החריפה בין הזרם I למרחק d : הרחקת החוד מפני הלוח

ב- $\frac{1}{2}$ מקטינה את הזרם I בסדר גודל. על תלות זו מבוסס עקרון הפעולה של הממ"ס.

תרשים 4 מתאר סכימטית ממ"ס, שנבנה לפני כ-10 שנים. המינהור הוא בין החוד לדגם. החוד קשור לתלת-רגל מחומר פיאזו-חשמלי (piezo-electric), כלומר חומר המשנה את מימדיו בהשפעת שדה חשמלי. שלוש הרגליים של התלת-רגל הן בכיוון מערכת צירים x, y, z . הפעלת מתח של 0.1 וולט על רגל משנה את אורכה בקירוב ב- $\frac{1}{2}$. כדי להניע את החוד מעל לדגם מפעילים מתחים ישרים על הרגליים x, y . הפעלת מתחי-חלופין עליהן, לדוגמה מתחים

של "שיני-משור", תגרום לכך, שהחוד יסרוק את פני הדגם בקווים מקבילים לציר y (תרשים 4). שינוי גובה החוד מפני

הדגם מבוצע על-ידי הפעלת מתח V_z על רגל Z .



תאור סכימתי של ממי"ס. תנועת הסריקה של החוד מעל לדגם (התמונה בתוך העגול) יוצרת את התמונה הנראית על מסך המחשב (לפי (4) ברשימת המקורות).

the figure is reprinted from: J.A. Golovchenko, The Tunneling Microscope: A New Look at the Atomic World, fig 1, p.49, Science, 232, 48, 1086, with the kind permission of the author and The American Association for the Advancement of Science, copyright 1986.

טווח ההזזה המקסימלי של מערכת פיאזו-חשמלית הוא מאות אנגסטרומים. אם דרושה הזזה גדולה יותר, יש להוסיף מערכת מיכנית, למשל בורג מיקרומטרי. נניח שבהתחלת הסריקה היה המרחק בין החוד לדגם d (זרם המינהור $I(d)$). אם בזמן הסריקה עובר החוד מעל מדרגה יקטן המרחק, $d < d_0$, זרם המינהור $I(d)$ יגדל אקספוננציאלית בהתאם למשוואה (4). מכאן שהשינויים

(ב- $I(d)$) עוקבים אחרי שינויי-הגובה בפני הדגם והעקומה

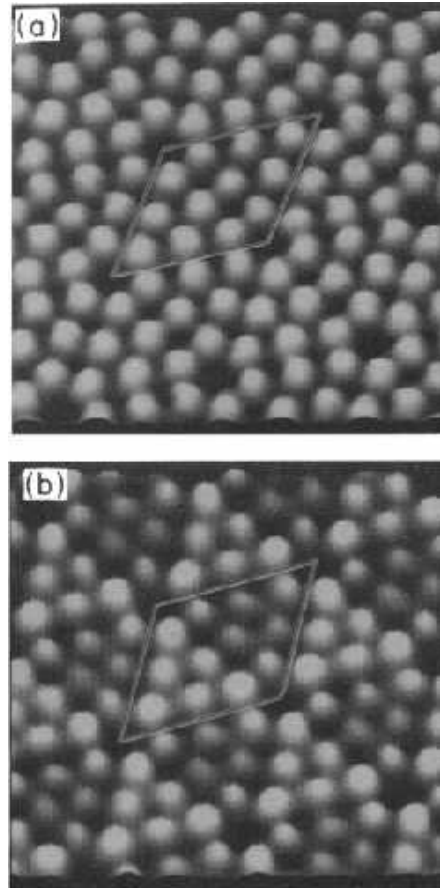
$I = f(z, y)$ לאורך קו סריקה y ממלאת תפקיד של חתך טופוגרפי (תרשימים 1 ו-4). מובן שמערכת ההפעלה של הממ"ס כולה ממוחשבת, ו"המפה הטופוגרפית" מופיעה על מסך המחשב בזמן אמת. בעזרת תוכניות גרפיות אפשר להפוך את המפה לתאור תלת-ממדי בפרספקטיבה רצויה, (תרשים 2). כושר ההפרדה הגבוה, האטומי, של הממ"ס דורש שמבנהו יהיה יציב ביותר ויגן על הדגם והחוד בפני רעידות מיכניות, שינויי-טמפרטורה וכו'. להקטנת זעזועים מיכניים משתמשים באמצעי פשוט, זול ויעיל: שמים את הממ"ס על מספר טבעות מתכתיות כבדות המופרדות ביניהן ע"י חתיכות של ויטון (מין גומי סינטטי), שהתגלה כבולם זעזועים מעולה. למניעת שינויי-טמפרטורה מפעילים את הממ"ס בואקואום או לפחות בתא סגור, המונע רוח פרצים (תרשים 5 - מופיע בצבע על הכריכה).

נמשיך ונתאר כמה תוצאות נסיוניות המדגימות את רב גוניותו של הממ"ס. ראינו שהוא מסוגל למקם אטומים בדיוק העולה על 1 אנגסטרם (תרשים 2) אך בדרך כלל איננו מצליח לזהות את האטום הנמצא מתחת לחוד. אם פני הדגם מורכבים משני סוגי אטומים A ו-B, כמעט אין אפשרות לקבוע, אם החוד נמצא מעל A או מעל B. הדגם הראשון בו הצליחו לעשות זאת היה המוליך למחצה GaAs. התברר, שכאשר החוד נמצא מעל אטום Ga כיוון זרם המינהור הוא מן החוד אל הדגם, ומעל As- כיוונו הוא הפוך. רמות הפנים מעל As הן מלאות (occupied surface states) ולכן מסוגלות לתרום אלקטרונים לזרם המינהור; מעל Ga הן ריקות.

תרשים 6 מתאר את תוצאת הסריקה, והוא מופיע בצבע על גבי כריכת גליון זה. הצבע הירוק מסמן את סביבת אטומי ה-Ga, והכתום - את סביבת אטומי ה-As. צהוב מסמן איזור ביניים, שם זרם המינהור כמעט שווה בשני הכיוונים. לשון אחרת, צהוב מסמן את איזור החפיפה של ענני- האלקטרונים משני האטומים, איזור החפיפה של שתי פונקציות הגל.

הדוגמא הבאה מוכיחה, שהממ"ס מסוגל לקבוע, האם אטום מסוים השתתף או לא השתתף בתהליך כימי. המדובר בתגובה שבין פני צורן לגז אמוניה NH₃. תרשים a7 מתאר את פני הצורן (Si) לפני החשיפה לגז. אטומי הצורן מיוצגים על-ידי העיגולים הלבנים. 12 האטומים בתוך המעוין המסומן מהווים את תא היחידה (השווה לתרשים 2). תרשים b7 נתקבל לאחר החשיפה: כמחצית האטומים בתא היחידה לא נראים יותר; אלה הם, כמובן, אטומים שהשתתפו בתגובה הכימית.

הממ"ס יכול לשמש גם כלי עבודה המסוגל להזיז אטומים ממקומם, למשל אטומים של קסנון (Xe) הנמצאים על פני ניקל (Ni). בתרשים a8 נראים אטומי הקסנון (הנקודות הלבנות) מפוזרים אקראית על פני הניקל, ב-F8 הם יוצרים את האותיות IBM. ההזזה התבצעה כדלקמן: ראשית מיקמו את החוד של הממ"ס מעל אטום קסנון מסוים ואח"כ קרבו את החוד לפני הניקל, עד שזרם המינהור גדל לערך מסוים



תרשים 7.

a. פני צורך לפני חשיפתן לגז אמוניה המעוין מסמן את תא היחידה.

b. פני צורך אחרי החשיפה (מתוך 6) ברשימת המקורות).

R. Wolkow, Atom-resolved surface chemistry studied by scanning tunneling microscopy and spectroscopy, figs. 2a, 2b, p. 5093, Phys. Rev. B, 39, 8, 1989, with the kind permission of the authors and the American Physical Society & the figure is reprinted from: Ph. Avouris

4 אנגסטרום לשנייה. כשהגיע הקסנון למקומו, הרימו את החוד ומיקמו אותו מעל ל"אטום הבא בתור". התהליך בוצע בטמפרטורה נמוכה, K_4 , גם כדי להקטין את התנועה התרמית של האטומים וגם כדי למנוע ספוח של אטומים זרים אל פני הניקל. תרשים f8 מתאר ללא ספק את שלט הפרסומת הקטן ביותר בעולם, גובהה של כל אות כ- 50. מצד שני קשה להגיד שזאת חברת תובלה מהירה במהירות של

4 אנגסטרום לשנייה הם בערך 1 ס"מ לשנה!

מיקרוסקופ הכח האטומי [חזרה לתחילת המאמר](#)

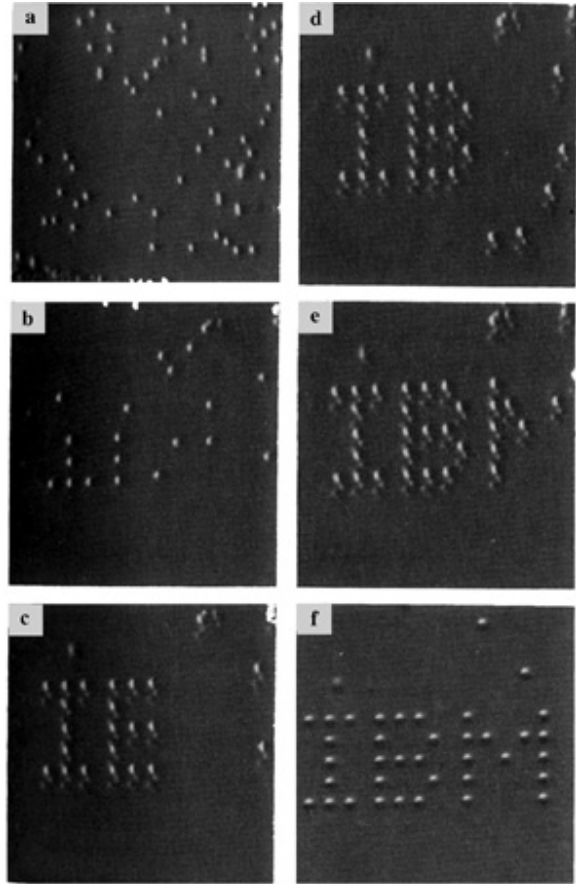
הממ"ס פועל רק על פני מוליכים או מוליכים למחצה המסוגלים לספק את האלקטרונים לזרם המינהור

עבור מבדדים קיים מכשיר אחר, מיקרוסקופ הכוח האטומי (מכ"א, Atomic Force Microscope, AFM) שמבנהו דומה לזה של הממ"ס והוא פותח על-ידי קבוצת מדענים שבראשה עמד ג. ביניג, אחד משני הממציאים של הממ"ס. המכשיר מנצל את הכוחות הפועלים בין האטומים (או המולקולות) של פני-הדגם לבין אטומי-החוד. טיב הכוחות ועוצמתם תלויים במרחק שבין האטומים: במרחקים מעל 15 \AA שולטים כוחות ון דר ולס (Van der Waals) ובמרחקים קצרים יותר ועד 1 \AA פעיל כוח משיכה שמקורו בקשר הכימי. תלותו במרחק היא אקספוננציאלית וגודלו, במרחק של 2 \AA , מסדר גודל של 10^{-9} N . במרחקים קצרים מ- 1 \AA שולטים כוחות הדחיה בין גרעיני-האטומים. תרשים 9 הוא סכימה של אחד הדגמים הראשונים של מכ"א.

החלק המרכזי בו הוא זרוע זעירה עשויה מחומר מבודד (למשל קוורץ), שבצידה האחד חוד הנוגע בדגם המבדד, צידה השני מצופה זהב. ממדי הזרוע הזעירה הם:

$10^{-4} \times 10^{-4} \times 10^{-4} \text{ m}$ עובי, $10^{-4} \times 10^{-4} \times 10^{-4} \text{ m}$ ס"מ רוחב, ו- $10^{-4} \times 10^{-4} \times 10^{-4} \text{ m}$ ס"מ אורך. הדגם מוזז כלפי הזרוע הזעירה על-ידי מנגנון פיאזו-חשמלי. הגלאי של מכ"א הוא ממ"ס, שחודו מרחף מעל ציפוי הזהב של הזרוע הזעירה. זרם המינהור מתקיים בין הציפוי לחוד הממ"ס, וכך מתורגמות כל תנועות הזרוע לשינויי זרם מינהור. היום משתמשים גם בגלאים אחרים, למשל אופטיים: קרן לייזר שפוגעת בזרוע זעירה מוחזרת מן הציפוי המתכתי.

התאבכות שתי הקרניים, הפוגעת והמוחזרת, יוצרת גלים עומדים, שעוצמתם נמדדת ברגישות גבוהה. תנועות הזרוע הזעירה גורמות לשינויים בעוצמת הגלים העומדים. כושר ההפרדה של מכ"א זהה לזה של ממ"ס, "אחיו התאום". המכ"א, הממ"ס והמיקרוסקופ האופטי הרגיל יכולים



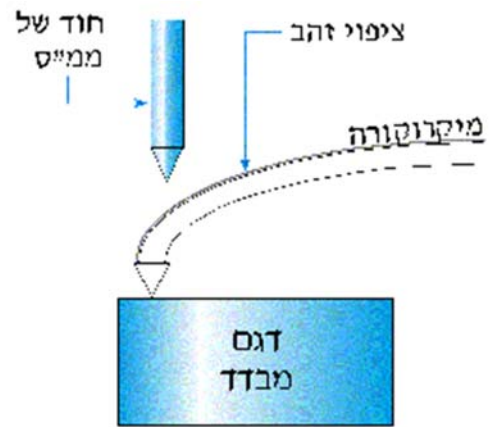
תרשים 8. סדרה של תמונות-מ"ס המתארת הזזת אטומים של קסינון על פני גביש ניקל. בתמונה a8 האטומים מסודרים באקראי, ב-f8 הם יוצרים את האותיות IBM. גובה כל אטום 50 (מתוך 7) ברשימת המקורות).

E. K. & the figure is reprinted with the kind permission of the authors and Macmillan Magazines Limited, copyright 1990, from: D.M. Eigler & E. Schweizer, Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope, fig 1, Nature, 344 (letters to Nature), 524, 1990

שלושתם לפעול באוויר ועם דגמים המכוסים בנוזל. לכן הם מאפשרים מחקר תהליכים ביולוגיים שאינם מתקיימים בואקואום, וגם דורשים סביבה נוזלית. תרשים 10 נלקח

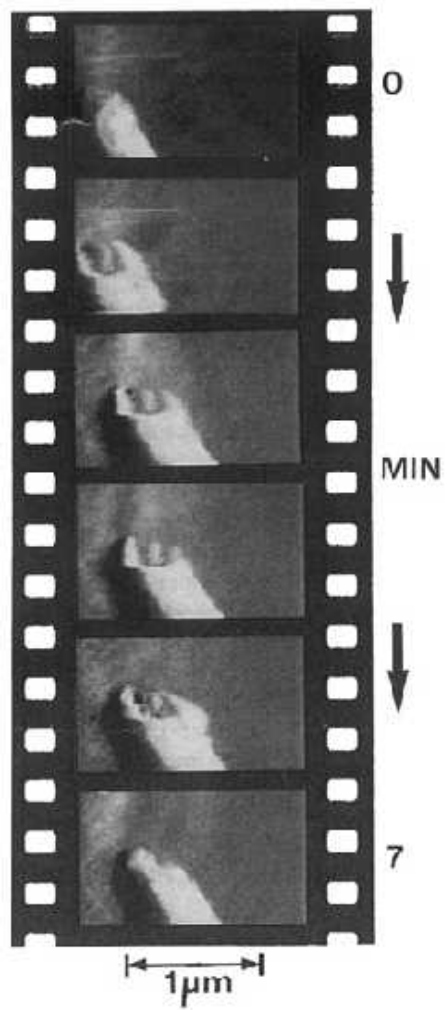
ממחקר כזה.

הוא מתאר בסדרה של 6 תמונות, מה קורה לתא חי הנלקח מכליה של קוף, אחרי שווירוסי- האבעבועות חדרו לתוכו. הווירוסים, המתרבים בתוך התא, גורמים להופעת בליטה בצורת אצבע. הבליטה קשורה, כנראה, ליציאת הווירוסים החדשים מן התא. אחרי שעזבו את התא הבליטה נעלמת, אך התא נשאר פגוע עם צלקת. מאורעות אלה התרחשו 20



תרשים 9

תאור סכימתי של מיקרוסקופ כוח אטומי (מכ"א).



תרשים 10. סדרה של תמונות מכ"א המתארת מה קורה לתא חי הנלקח מכליה של קוף, אחרי שווירוס-האבעבועות חדרו לתוכו (מתוך 8) ברשימת המקורות).

figure reprinted from: W. Haberle et al., In situ investigations of single living cells infected by viruses, fig 8, Ultramicroscopy, 42-44, 116, pp.1161-1167, with the kind permission of the authors and Elsevier Science - NL, Sara Burgerhartstraat 25, 1055KV Amsterdam, The Netherlands

שעות לאחר חשיפת התא לוורוס, ובמשך כל הזמן התא היה במעקב צמוד של המכ"א. זה המכשיר היחידי המסוגל לתאר בזמן אמת תהליך ביולוגי המתרחש בתא חי ובממדים הקטנים בהרבה ממיקרומטר.

נסיים בתיאור מחקר, שהוכיח כי הממ"ס מסוגל לגלות טעינת קבל על-ידי אלקטרון אחד, כלומר "כושר הפרדה של קוונט המטען החשמלי". כדי להעביר מטען Q בין לוחות של קבל בעל קיבול C דרושה אנרגיה E:

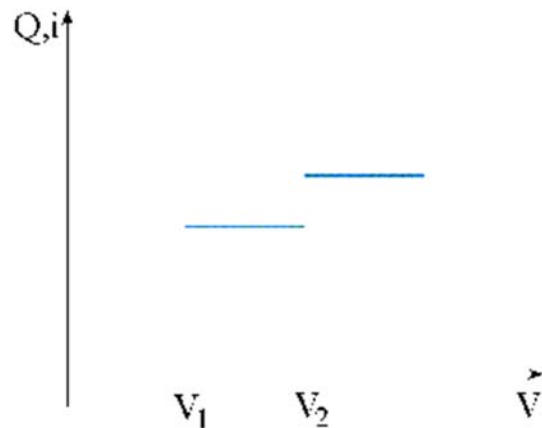
$$E = \frac{1}{2C} Q^2 \quad (a5)$$

E מינימלית - E_{min} - עבור Q השווה למטענו e של האלקטרון:

$$E_{\min} = \frac{1}{2C} e^2 \quad (b5)$$

במעגל חשמלי המורכב ממקור מתח משתנה V וקבל C, העקומה של Q כנגד V תראה קפיצה, כל פעם

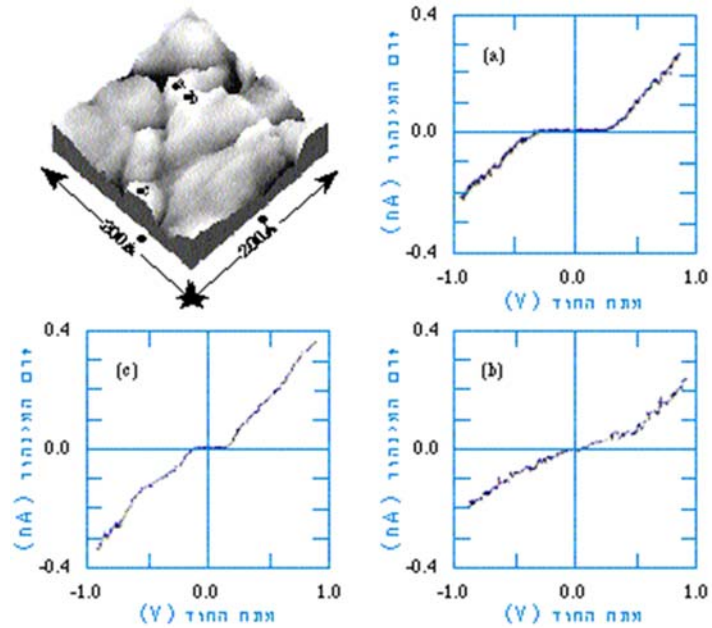
ש: $Q(V) = C(V - 2Q\Delta V)$. עקומה דומה תתקבל עבור I כנגד V. I הוא הזרם במעגל, ראה תרשים 11.



תרשים 11

"מדרגות קולון", כלומר העקומה המתארת את הקשר בין מטענו Q של קבל לבין המתח עליו V . הקפיצות קורות כש- Q גדל במטענו של אלקטרון אחד. i הוא הזרם במעגל.

עקומת הקפיצות ידועה בשם ("Coulomb Staircase") "מדרגות קולון" ונחקרת זה למעלה מ-25 שנה.



תרשים 12

המדרגות מופיעות רק בטמפרטורה נמוכה, בה האנרגיה התרמית של האלקטרונים kT קטנה מ- E_{min} .
 ב- $K1$ ועבור $\Delta V = 1V$ דרוש קיבול שלא יעלה על F_{10-15} ; הקיבול בין החוד לדגם בממ"ס קטן מזה
 בהרבה ולכן אפשר לראות בעזרתו את המדרגות של קולון.

תרשים 12 מראה שלוש תוצאות נסיוניות שנתקבלו. הדגם של הממ"ס היה זהב גרגרי על מצע מבדד של תחמוצת האלומיניום Al_2O_3 . כל עקומה בתרשים 12 נתקבלה במקום אחר של הדגם. זו דוגמא לשילוב בין מדידות טופוגרפיות למדידות חשמליות. מן העקומות הנסיוניות אפשר לחשב בקלות את הקיבול בין הדגם לחוד: F_{10-19} , קטן בארבעה סדרי-גודל מן הקיבול המקסימלי הנייל, ולכן אפשר היה לערוך את המדידות בטמפרטורה של אוויר נוזל, K_{78} . המחקר בוצע במכון רקח לפיסיקה של האוניברסיטה העברית בירושלים, במעבדתו של ד"ר ע. מילוא.

רשימת המקורות: [חזרה לתחילת המאמר](#)

פרטים על פתרון משוואת שרדינגר למקרה של מחסום פוטנציאל אפשר למצוא בספרי הלימוד הדנים ב"פיזיקה מודרנית". (1. ברשימה זו).

	(Eisberg, Resnick: Quantum Physics (Wiley	.1
(Academic Press)	McGervey: Introduction to Modern Physics	
(Physics (Norton	French, Taylor: An Introduction to Quantum	
	(Ohanian, Modern Physics (Prentice Hall	
	.(1982) 57, 49 . Binnig et al., Phys. Rev. Lett	.2
.(1987)	R1, 61 . Hansma and Tersoff, J. Appl. Phys	.3
	.(1986) 48, 232 Golovchenko, Science	.4
.(1987)	1192, 58 . Feenstra et al., Phys. Rev. Lett	.5
	.(1989) 5091, 39 . Avouris and Wolkow, Phys. Rev	.6
	.(1990) 524, 344 Eigler and Schweizer, Nature	.7
	.(1992) 116, 42-44 berle et al., Ultramicroscopy	.8
	.(1994) 8961, B50 . Bar-Sadeh et al., Phys. Rev	.9

לקריאה נוספת:

	.1 (3) ו-(4) ברשימת המקורות.	
p. 40	, Binnig and Rohrer, Scientific American, August 1985	.2
	Rugar and Hansma, Physics Today, October 1990, p. 23	.3