



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

# דו"ח מעבדה: מיקרוסקופ מנהור סורק (STM)

מגישים:

אנה אפריאן 32068437

ולדי פרונקשין 320688914

לב ארמן 314371675

מדריך:

יותם ובר

תאריך:

22/1/22

## תוכן עניינים

1. מבוא ותיאוריה.....	3
1.1 מנהור קוונטי.....	3
1.2 מבנה ועקרון הפעולה של STM.....	3
1.3 אופני הפעולה השונים של מערכת STM.....	4
1.4 לולאת משוב.....	5
1.5 מבנה HOPG.....	6
1.6 מבנה זהב.....	6
1.7 הסריג ההופכי.....	7
1.8 FFT.....	8
2. ניסוי 1: סריקת HOPG.....	9
2.1 מטרת הניסוי.....	9
2.2 תיאור המערכת ומהלך הניסוי.....	9
2.3 תוצאות הניסוי.....	9
2.4 עיבוד תוצאות הניסוי.....	13
2.5 דיון בתוצאות ומסקנות.....	25
3. ניסוי מספר 2: ספקטרוסקופיית HOPG.....	27
3.1 מטרות הניסוי.....	27
3.2 תיאור המערכת ומהלך הניסוי.....	27
3.3 תוצאות הניסוי.....	27
3.4 עיבוד התוצאות.....	29
3.5 דיון בתוצאות ומסקנות.....	31
4. ניסוי מספר 3: סריקת זהב.....	33
4.1 מטרות הניסוי.....	33
4.2 תיאור המערכת ומהלך הניסוי.....	33
4.3 תוצאות הניסוי.....	33
4.4 דיון בתוצאות ומסקנות.....	34
5. ניסוי 4: ספקטרוסקופיית זהב.....	35
5.1 מטרת הניסוי.....	35
5.2 תיאור המערכת ומהלך הניסוי.....	35

35.....	5.3 תוצאות הניסוי
37.....	5.4 עיבוד תוצאות הניסוי
39.....	5.5 דיון בתוצאות ומסקנות
40.....	6. ניסוי 5: ניסוי הרחבה – מדידת סריג הופכי ל-HOPG
40.....	6.1 מטרת הניסוי
40.....	6.2 תיאור המערכת ומהלך הניסוי
40.....	6.3 תוצאות הניסוי
42.....	6.4 עיבוד תוצאות הניסוי
45.....	6.5 דיון בתוצאות ומסקנות
46.....	7. ניסוי 6: ניסוי בונס - סימולציה
46.....	7.1 מטרת הניסוי
46.....	7.2 תיאור המערכת ומהלך הניסוי
46.....	7.3 תוצאות הניסוי
47.....	7.4 עיבוד תוצאות הניסוי
50.....	7.5 דיון בתוצאות ומסקנות
51.....	8. סיכום ומסקנות
51.....	9. הצעות לשיפור הניסוי
52.....	10. רשימת מקורות
53.....	11. נספחים: מדידות ותמונות נוספות מהניסוי

## 1. מבוא ותיאוריה

### 1.1 מנהור קוונטי

על פי המכניקה הקלאסית, חלקיק בעל אנרגיה הנמוכה ממחסום הפוטנציאלי הנמצא לפניו לא יוכל לעבור אותו. בניגוד למכניקה הקלאסית, באמצעות הסתכלות על העולם הקוונטי נוכל לתאר את החלקיק בתור פונקציה גל של חלקיק חופשי. האמפליטודה שלה תציין את ההסתברות של החלקיק להיות במיקום מסוים ומשוואת שרדינגר מתארת את הדינמיקה של החלקיק באמצעותה נוכל להסביר את היכולת של חלקיק "לחדור" דרך מחסום פוטנציאל למרות שאין לו אנרגיה מספיקה.

על ידי פתרון של משוואת שרדינגר עבור גל חופשי, יחד עם השימוש ברציפות פונקציית הגל על קצוות המחסום נקבל פתרון למשווה:

$$(1) \quad \Psi(x) = \Psi(0) \exp \left[ -\frac{\sqrt{2m(\phi-E)}z}{\hbar} \right]$$

כאשר  $m$  מסת החלקיק,  $E$  האנרגיה של חלקיק ו- $\phi$  פוטנציאל, כך ש- $\phi < E$ .

עבור מערכת ה- $STM$  הפוטנציאל ניתן על ידי המרווח בין הטיפ הסורק לבין הדגימה (נרחיב בחלק על מערכת הניסוי) עבור ההנחה כי פונקצית העבודה של הדגימה והטיפ שוות ועל ידי סיפוק של מתח משוב  $V$  באלקטרונים בדגימה יכולים לבצע מנהור לטיפ וימדוד זרם. עבור מתח משוב הקטן ביחס לפונקצית העבודה, נקבל כי רמת האנרגיה שהאלקטרונים הגיעו ממנו תואמות לרמות פרמי (רמת האנרגיה המאוכלסת הגבוה ביותר במערכת פרמיונים). זרם המנהור דרך מחסום הפוטנציאל:

$$(2) \quad I \propto V_{bias} \rho_s(E_f) e^{\left( \frac{\sqrt{2m(\phi-E)}z}{\hbar} \right)} \propto V_{bias} \rho_s(E_f) e^{-1.05\sqrt{\phi}z}$$

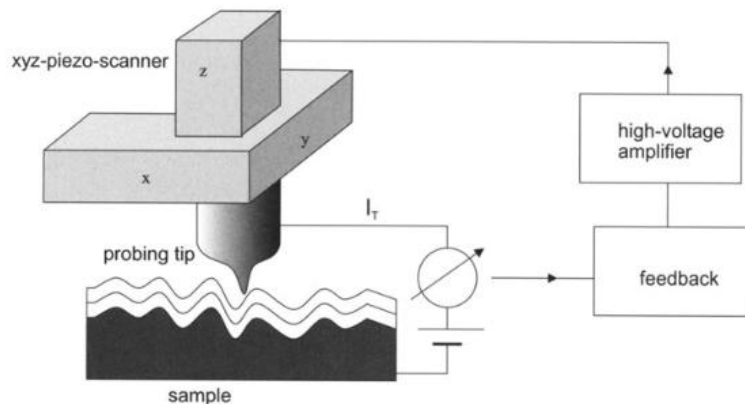
כאשר  $I$  הזרם,  $V_{bias}$  מתח המשוב,  $\rho_s(E_f)$  צפיפות המצבים ברמת פרמי,  $\phi$  פונקציה העבודה,  $E$  האנרגיה המתווספת לאלקטרונים,  $m$  מסת האלקטרון ו- $z$  המרחק בין הדוגמה לטיפ.

### 1.2 מבנה ועקרון הפעולה של STM

מערכת  $STM$ , מיקרוסקופ המנהור הסורק, הוא כלי המשמש להדמייה של משטחים ברמה האטומית. המערכת מורכבת מטיפ עם קצה חד העשוי מ- $Pt:Ir$  (פלוטוניום אירידיום) הנע במרחק של אנגסטרומים ממשטח עליו מונחת דגימה אותה הוא סורק באמצעות אפקט המנהור עליו דיברנו ב-1.1. למערכת גבישים פייזואלקטריים-גביש מסוג זה הוא לרוב בעל צורה מלבנית, וכאשר מופעל עליו מתח הוא מתרחב. בנוסף הם בעלי תכונת היסטריזיס, כלומר פעולת ההתרחבות לא הפיכה באופן מיידי, כך שסריקות חוזרות של "הלוך ושוב" לאורך ציר מסויים גוררות שיבוש בתמונה המוצגת.

ההתקנים הפייזואלקטריים הללו מאפשרת הנעה בשלושה צירים מאונכים זה לזה, כך שיש לנו התקן פיזאזו לציר ה- $X$ , לציר ה- $Y$ , ולציר ה- $Z$ . עליהם מופעל מתח שמשנה את צורתו בצורה עדינה כך שהם מתרחבים ומתקוצצים. כאשר נפעיל מתח משתנה על התקן פיזאזו נוכל לסרוק את הדגימה בכול מיני מיקומים על גבי

מישור X-Y, בכל גובה Z שנבחר. ברגע שהמחט מתקרבת אל הדגימה, פונקציית הגל של האלקטרונים על הדגימה יעשו התאבכות עם פונקציית הגל של האלקטרונים של הטיפ ובכך נקבל הולכת מנהור ביניהם. אם נפעיל מתח חיצוני בין שניהם נקבל זרם מנהור. המתח שנפעיל יקבע לנו אם הזרימה תהיה מהטיפ אל הדגימה או הפוך, כאשר עבור מתח V גדול מאפס נקבל זרימה מהטיפ אל הדגימה ו-V קטן מאפס מהדגם לטיפ.



איור 1: מבנה מערכת STM [5]

כיוון שאפקט המנהור רגיש מאוד, כל תנודה של הטיפ יכולה לפגוע באיכות התמונה המתקבלת או לפגוע באיכות ה"חוד" ובכך להפסיק את אפקט המנהור כלל. לכן בכדי לשכך את ההרעשים המכנים אנו מציבים את המערכת על גבי התקן הנועד לבודד תנודות. את זאת נשיג על ידי קונסטרוקציה של פלטת שיש גדולה המונחת על גבי כדורי גומי הבולמים את התנודות, על פלטת השיש הגדולה מונחת שכבת גומי עליה יושבת פלטת שייש קטנה יותר שהיא מחזיקה את מערכת ה-STM.

### 1.3. אופני הפעולה השונים של מערכת STM

על ידי סריקה דו-מימדית של הדוגמא, נוכל לקבל אינפורמציה על הטופוגרפיה של הדגימה אותה אנו בודקים. האינפורמציה שמתקבלת היא בעצם צפיפות המצבים באזור הזה. שני אופני הסריקה העיקריים הינם:

- סריקה בזרם קבוע - הסריקה מתבצעת בזרם קבוע הנשמר על ידי מעגל המשוב. דרך הטיפ זורם הזרם הקבוע בזמן שהוא נע לאורך המשטח בעזרת ההתקנים הפיזואלקטריים והמערכת רושמת את מרחק הטיפ מהדגימה. שיטה זו מאפשרת סריקת שטחים גדולים שאינם שטוחים תוך הורדת הסיכוי למגע בין הטיפ לדגימה וקבלת קריסה של הטיפ (collapse). החסרון העיקרי בשיטה זאת הוא שמהירות הסריקה מוגבלת למהירות התגובה של מעגל המשוב.
- סריקה בגובה קבוע - בשיטה זו מעגל המשוב הפיזואלקטרי כבוי, המערכת שומרת על גובה קבוע של הטיפ וזרם המנהור נקלט בכול נקודה במהלך הסריקה של הדגימה. הסריקה מהירה יותר בשיטה זו ויש פחות רעשים אלקטרוניים. עם זאת החסרון המשמעותי ביותר הוא ששינויים חדים בגובה הדגימה עלולים לגרום לקריסה של הטיפ ולהרוס אותה.

ספקטרוסקופיה - באמצעות מכשיר ה-STM נוכל לבצע ספקטרוסקופיה בנוסף לאופני סריקה שדיברנו עליהם. את הספקטרוסקופיה נבצע על ידי שינוי מתח המנהור בנקודה מסוימת ומדידת הזרם על מנת לקבל את צפיפות המצבים באותו מקום. צפיפות מצבים זו פרופורציונית לנגזרת של הזרם סביב האנרגיה המתאימה למתח המנהור.

על מנת למצוא את צפיפות המצבים כתלות במתח, חישבנו את הנגזרת הלוגוריתמית של הזרם כתלות במתח.

$$(3) \quad \frac{d[\ln(I)]}{d[\ln(V)]} = \frac{\frac{dI}{dV}}{\frac{I}{V}}$$

ניתן להשתמש בספקטרוסקופיה כדי למצוא את צפיפות המצבים סביב רמות פרמי ולקטלג את הדגימות לפי רמת ההולכה שלהם כמתואר בתרשים הבא:

	Metal	Semi-Metal	Semiconductor	Insulator
Electronic Structure				
I-V				
dI/dV				

איור 2: מוליכות חומרים והיחס בין נגזרת הזרם לנגזרת המתח [6]

#### 1.4. לולאת משוב

הטיפ נע במקביל למישור דגימה, לכן בכדי שיהיה אפשר לשלוט על זרם קבוע, הבקרה על מרחק הטיפ מתבצעת בעזרת מעגל משוב. במעגל המשוב של המערכת אנו משתמשים בשני בקרים:

- P-Gain: בקר פרופורציונלי, מתקן את השגיאה הנמדדת באופן פרופורציונלי לשגיאה המיידית, הגדלת ערכו יתן תיקון חד יותר של השגיאה.

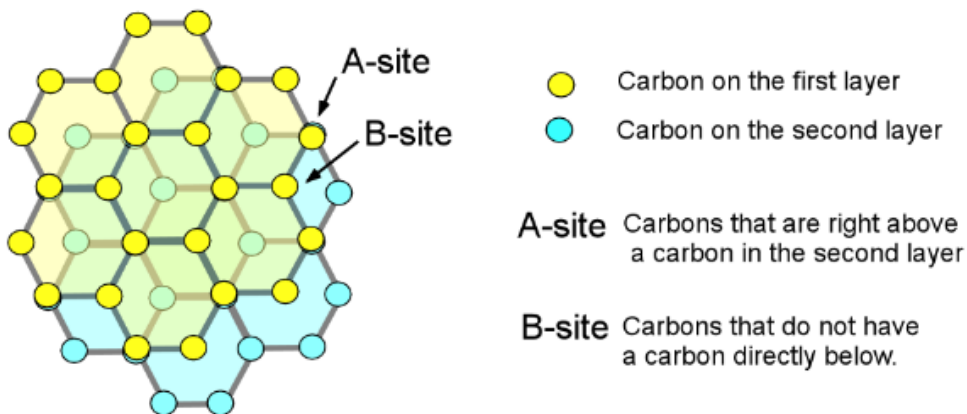
- I-Gain: בקר אינטגרלי, מתקן את השגיאה באופן פרופורציוני לסכימת השגיאה לפי זמן, מתחילת המדידה.

## 1.5 מבנה HOPG

Highly Oriented Pyrolytic Graphite או הגרפיט הוא מוליך הבנוי משכבות טבעותיות בעלות שישה מולקולות פחמן כאשר בתוך השכבות, כל אטום פחמן מקיים שלושה קשרים קוולנטים, בהם הוא משתף את האלקטרונים שלו עם אטומים שכנים, קשרים אלו יוצרים מבנה רציף של משושים. הקשרים בין השכבות הם קשרי ואן-דר-ואלס, קשרים אלו הם קשרים אלקטרומגנטיים חלשים יותר מהקשרים בין אטומי הפחמן על המישור, כך שהאלקטרונים חופשיים יותר, דבר המאפשר הולכה חשמלית של הגרפיט ותורם לכך שניתן בקלות לתלוש שכבות מהגרפיט. ניתן לראות באיור 3 ששכבות הגרפיט מוזזות אחת ביחס לשניה, כך שישנם אטומים בשכבה העליונה שמתחתם יש אטום בשכבה התחתונה. אנו רוצים להתבונן בגרפיט על ידי מנהור בזכות התגובה החלשה שלו עם חומרים הנמצאים באוויר לכן ניתן להגיע איתו לרזולוציה טובה עם STM.

הגדלים שניתן לראות בסריג של גרפיט הם:

- קבוע הסריג a - מרחק בין כול שני אטומים שכנים,  $0.141[nm]$
- קבוע הסריג b – מרחק בין אטומים שאינם עוקבים,  $0.246[nm]$
- קבוע הסריג c - המרחק בין שתי שכבות,  $0.340[nm]$

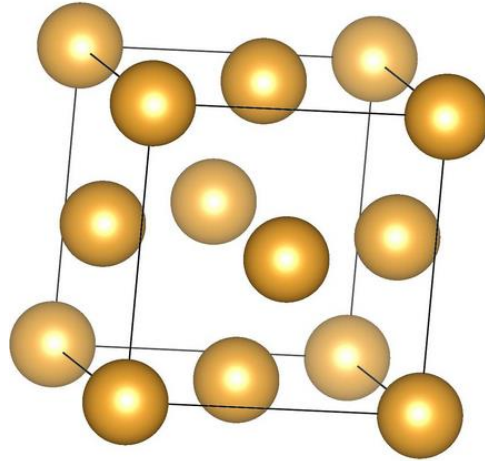


איור 3: מבנה של גביש HOPG

## 1.6 מבנה זהב

זהב הוא יסוד כימי עם הסמל Au ומספר אטומי 79, מה שהופך אותו לאחד מיסודות המספר האטומי הגבוה יותר המופיעים באופן טבעי. בצורה טהורה, זוהי מתכת בהירה, צהובה מעט כתומה, צפופה, רכה, ניתנת

לגימור וגמישה. מבחינה כימית, זהב הוא מתכת מעבר ויסוד מקבוצה 11. זהו אחד היסודות הכימיים הכי פחות מגיבים והוא מוצק בתנאים סטנדרטיים. מבנהו הגבישי של הזהב הוא מהצורה הגבישית FCC ובעל צפיפות גבוהה. לכן, פיזור האלקטרונים על פני משטח הזהב הוא רציף יחסית, מה שמקשה בקבלת רזולוציה אטומית עם ה־STM.



איור 4: אילוסטרציה עבור מבנה גבישי של זהב, FCC

## 1.7. הסריג ההופכי

הסריג ההופכי הוא בעל תפקיד חשוב בניתוחים של בגבישים. הינו מתקבל מהתאמת מספרי הגל לסריג במרחב המיקום, על ידי טרנספורם פורייה. בכך מקבלים את הסריג במרחב ה- $k$ . תכונות סריג זה חשובות לחקירת תופעות כמו דיפרקציה, הולכת חום ועוד.

וקטורי הסריג ההופכי  $\mathbf{b}_i$  מוגדרים כפונקציה של וקטורי הסריג הפרימיטיביים  $\mathbf{a}_i$  כך:

$$(4) \quad \mathbf{b}_i = 2\pi \frac{\epsilon_{ijk} a_j a_k}{a_i \cdot \epsilon_{ijk} a_j a_k}$$

$$\mathbf{b}_1 = 2\pi \frac{a_2 \times a_3}{a_1 \cdot a_2 \times a_3}$$

$$\mathbf{b}_2 = 2\pi \frac{a_3 \times a_1}{a_2 \cdot a_3 \times a_1}$$

$$\mathbf{b}_3 = 2\pi \frac{a_1 \times a_2}{a_3 \cdot a_1 \times a_2}$$

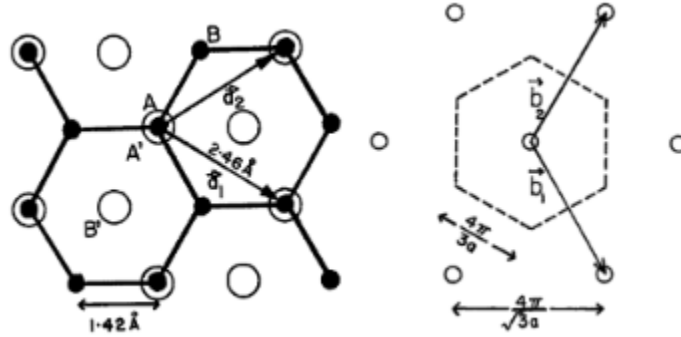


לפי זאת וקטורי הסריג ההופכי עבור גרפיט הם:

$$(5) \quad b_1 = \frac{2\pi}{a} \left( \frac{1}{\sqrt{3}}, -1, 0 \right) \quad , \quad b_2 = \frac{2\pi}{a} \left( \frac{1}{\sqrt{3}}, 1, 0 \right) \quad , \quad b_3 = \frac{2\pi}{a} (0, 0, 1)$$

$$b_1 = \frac{2\pi}{a} \frac{2}{\sqrt{3}} \quad , \quad b_2 = \frac{2\pi}{a} \frac{2}{\sqrt{3}} \quad , \quad b_3 = \frac{2\pi}{c}$$

כאשר  $a$  הוא המרחק בין שני אטומי פחמן סמוכים.



איור 5: משמאל מבנה סריג של גרפיט, מימין מבנה של סריג הופכי

## FFT 1.8

Fast Fourier Transform - FFT, הינו אלגוריתם נומרי יעיל (מבחינת סיבוכיות) לביצוע התמרת פורייה דיסקרטית. כמו התמרת פורייה הרגילה, השימוש בה מעביר מהמרחב המקורי למרחב התדר שלו. במקרה שלנו יישום למעבר ממרחב המיקום למרחב מספרי הגל.

טרנספורם פורייה דיסקרטי הינו:

$$(6) \quad X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-\frac{j(2\pi nk)}{N}}$$

והתמרה ההפוכה הינה:

$$(7) \quad x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot e^{\frac{j(2\pi kn)}{N}}$$

בעוד ה-FFT מאופיין בסידור איברי הטורים, חלוקם לזוגיים ואי-זוגיים ועוד מניפולציות מחשוביות נוספות.

ההתמרה עובדת מעל המרחב המרוכב ולכן נשתמש בערך מוחלט לקבלת תמונה הופכית.

## 2. ניסוי 1: סריקת HOPG

### 2.1 מטרת הניסוי

סריקת מבנה גרפיט HOPG ומדידת מימדיו – קבועי סריג וזוויות.

### 2.2 תיאור המערכת ומהלך הניסוי

המערכת מורכבת כמתואר בפרק 1.2. הכנו מחט על ידי חיתוך ומשיכה של חוט Pt:Ir והכנו דגימה שטוחה של HOPG על מגנט, לאחר קילוף השכבה המחומצנת ממנו. הגדרנו את הפרמטרים הבאים כמומלץ בספר ההדרכה [7]:

$$\frac{Time}{Line} = (0.1 \sim 0.7)[s], GapVoltage = 0.0501[V], I - Gain = 13, P - Gain = 12$$

וביצענו מדידות במוד זרם קבוע בטווחי רזולוציה שונים  $[1.25 \sim 200][nm]$  וטווחי גובה  $[0.7 \sim 15][nm]$  תוך כדי תיקונים לזווית בין המחט לדגימה על ידי התכנה. שמרנו את הסריקות שהתקבלו בצורה ברורה (לפי מראית עין).

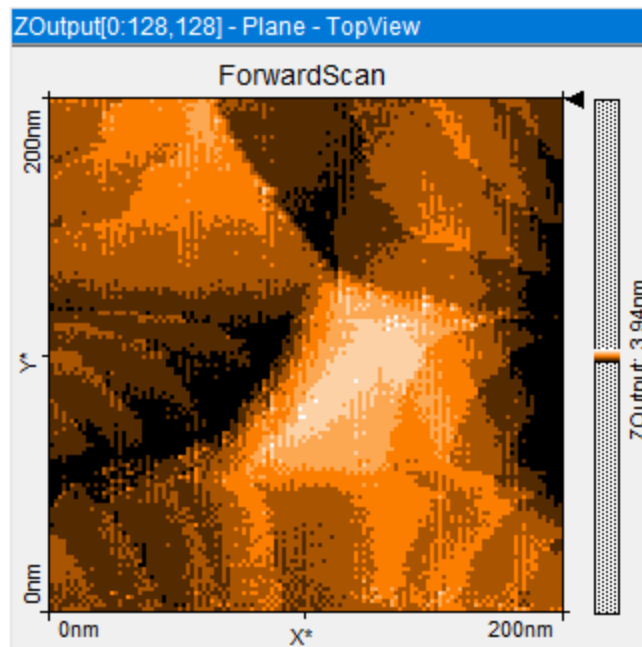
לאחר מכן שינינו את פרמטרי המערכת בצורה הבאה:

$$\frac{Time}{Line} = (0.1 \sim 0.7)[s], GapVoltage = 0.0501[V], I - Gain = 0, P - Gain = 2$$

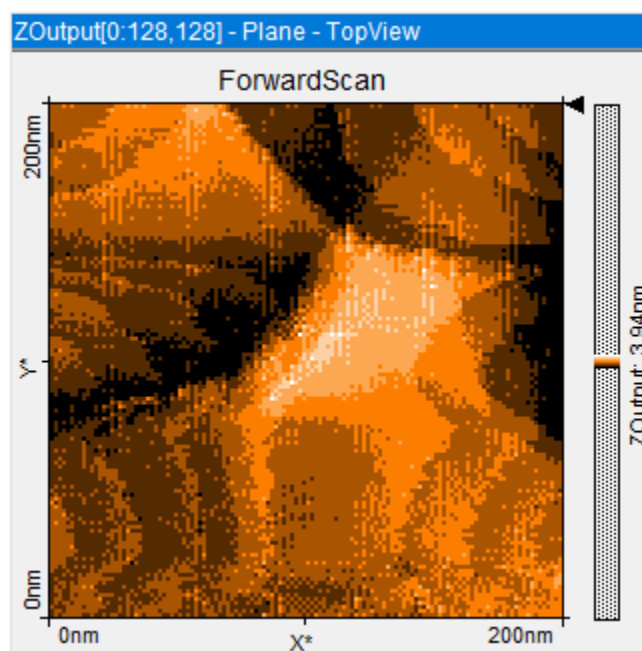
וביצענו מדידות במוד גובה קבוע בטווחי רזולוציה שונים  $[1.25 \sim 200][nm]$  וטווחי זרמים  $\pm(0.5 \sim 50)[nA]$  תוך כדי תיקונים לזווית. שמרנו את הסריקות שהתקבלו בצורה ברורה.

### 2.3 תוצאות הניסוי

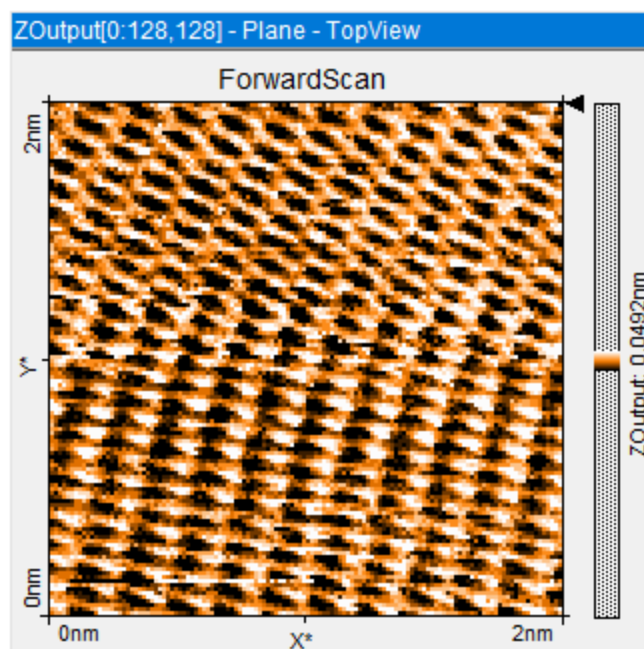
להלן תוצאות שנמדדו, כאשר הרזולוציה, השיטה וכיוון הסריקה (הולך או חוזר) בכותרות האיורים:



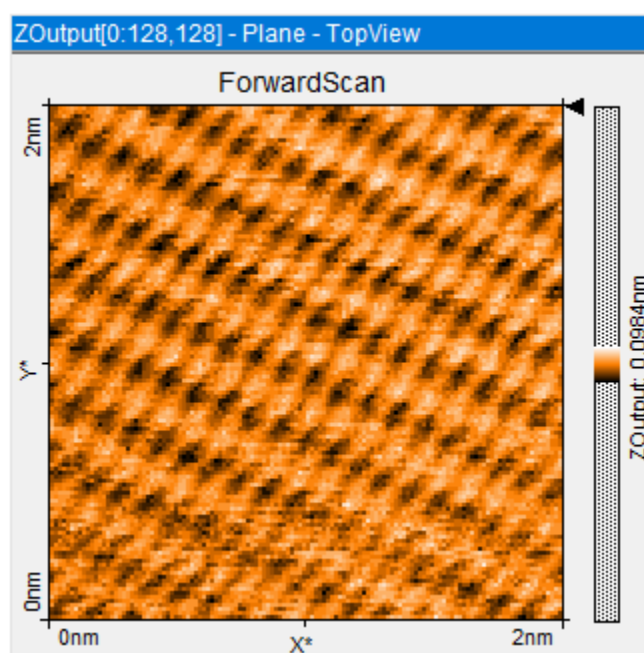
איור 6: HOPG ברזולוציה  $200[nm]$ , זרם קבוע, הלוך



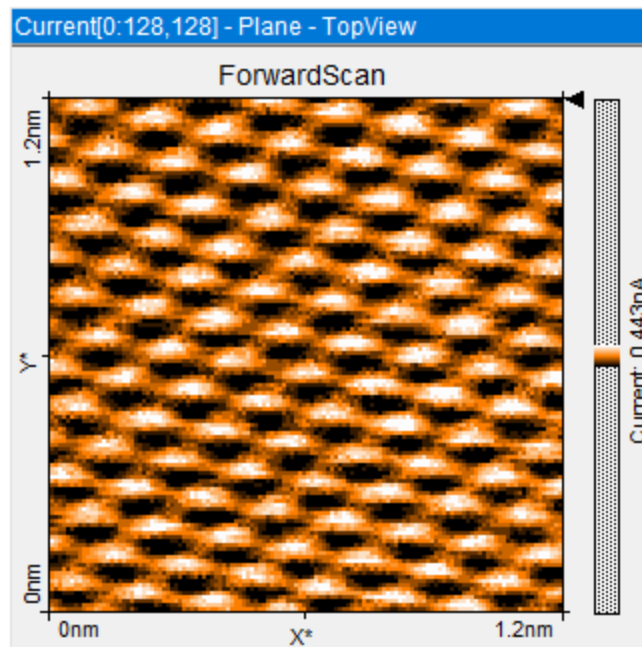
איור 7: HOPG ברזולוציה  $200[nm]$ , זרם קבוע, חזור



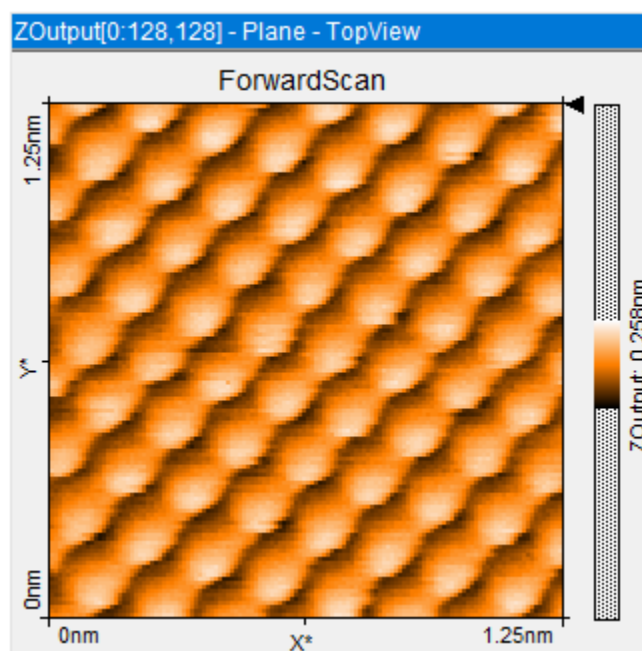
איור 8: HOPG ברזולוציה  $2[nm]$ , זרם קבוע, הלוך



איור 9: HOPG ברזולוציה  $2[nm]$ , זרם קבוע, חזור



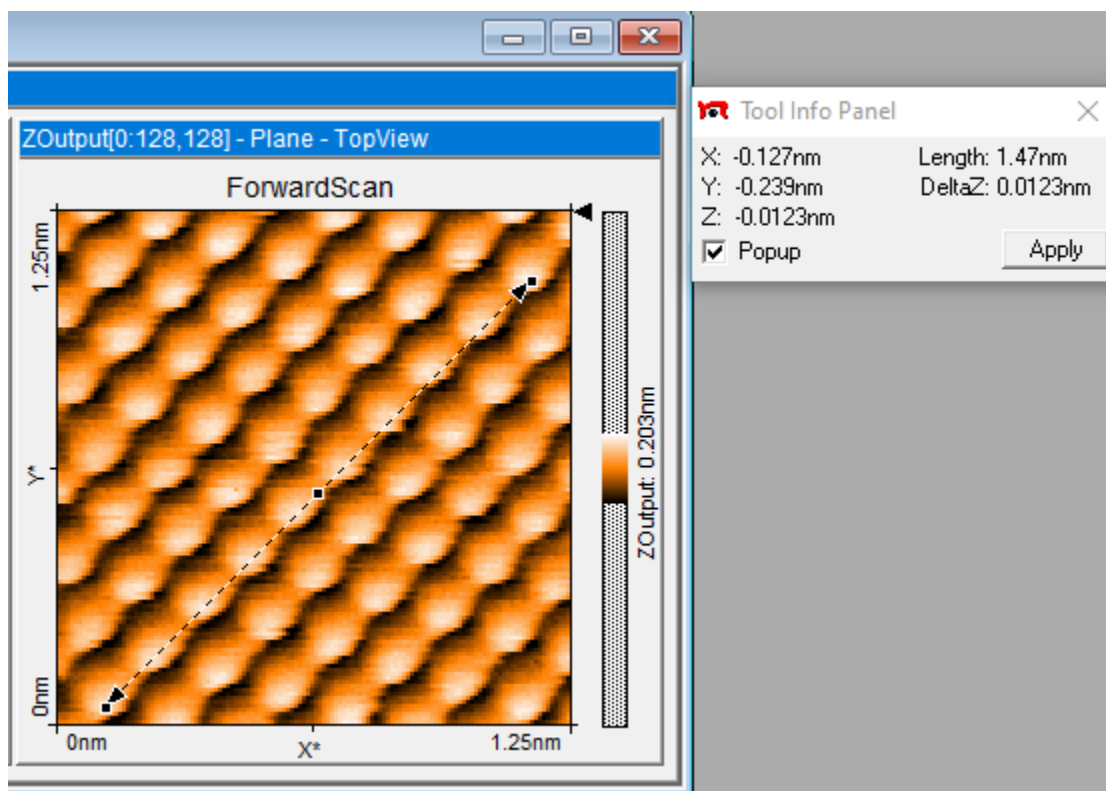
איור 10: HOPG ברזולוציה  $1.2[nm]$ , גובה קבוע, הלוך



איור 11: HOPG ברזולוציה  $1.25[nm]$ , זרם קבוע, הלוך

## 2.4 עיבוד תוצאות הניסוי

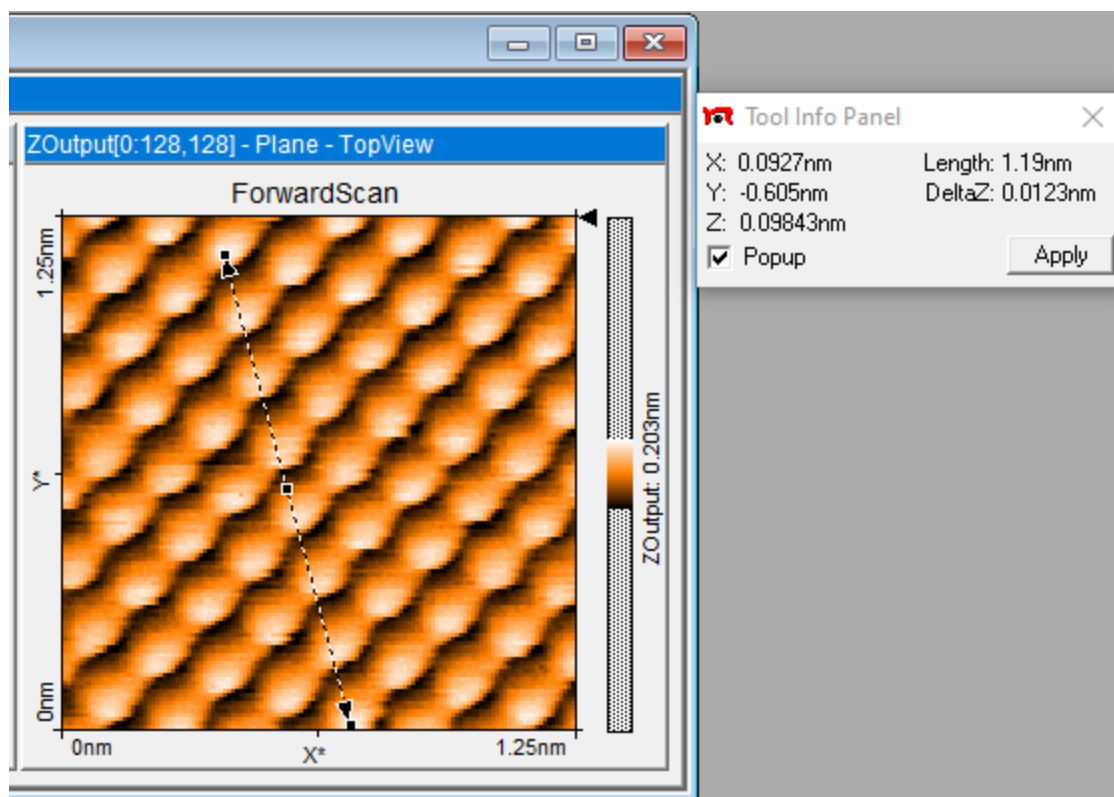
נשתמש בפונקציה הבנויה בתכנת הסורק. סימנו מרחקים כמה שיותר גדולים להקטנת אי הודאות. סרקנו בכיוונים שונים לכל תמונה, על מנת לוודא שאין "מריחה" לכיוון מסוים:



איור 12: מדידה מרחק 1, HOPG

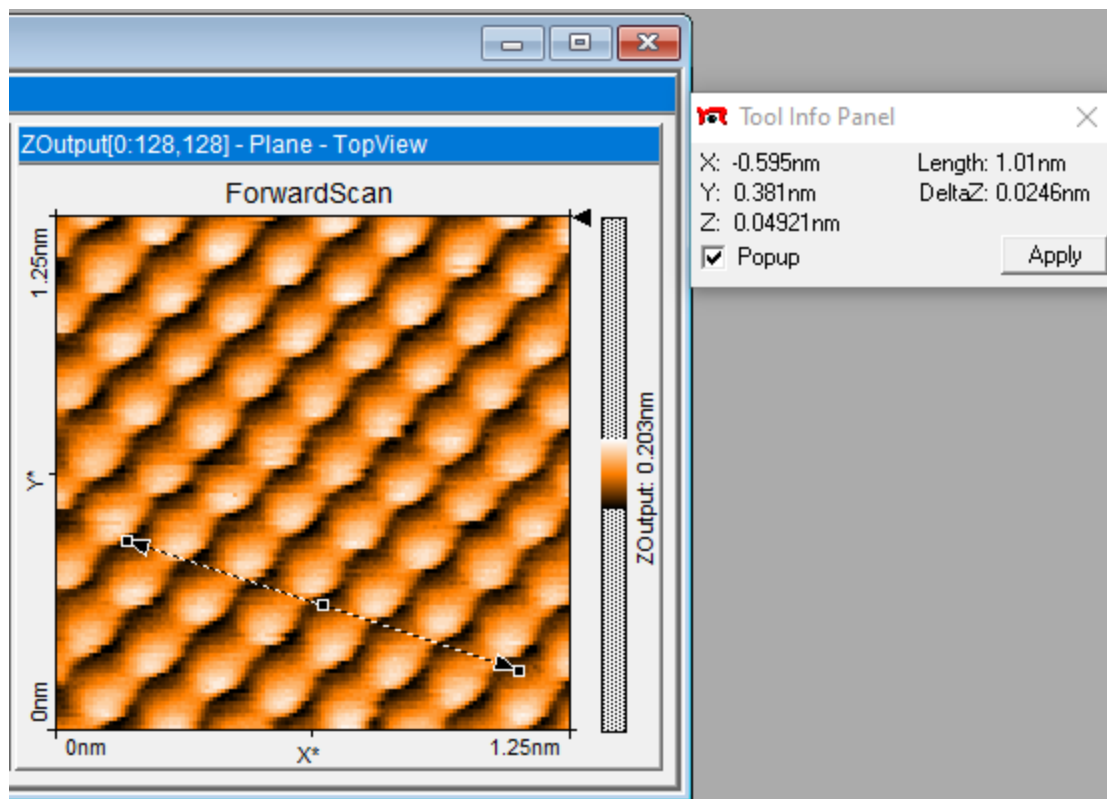
נחלק במספר המבנים שרואים:  $\frac{1.47 \pm 0.06}{9} = (0.163 \pm 0.006)[nm]$

אי הודאות נובעת משיקול ספרה אחרונה בתוצאה שהתכנה נותנת וחוסר הודאות בסימון גבול המדידה (מדידת מרחק בין הקצוות בסימון).



איור 13: מדידת מרחק 2, HOPG

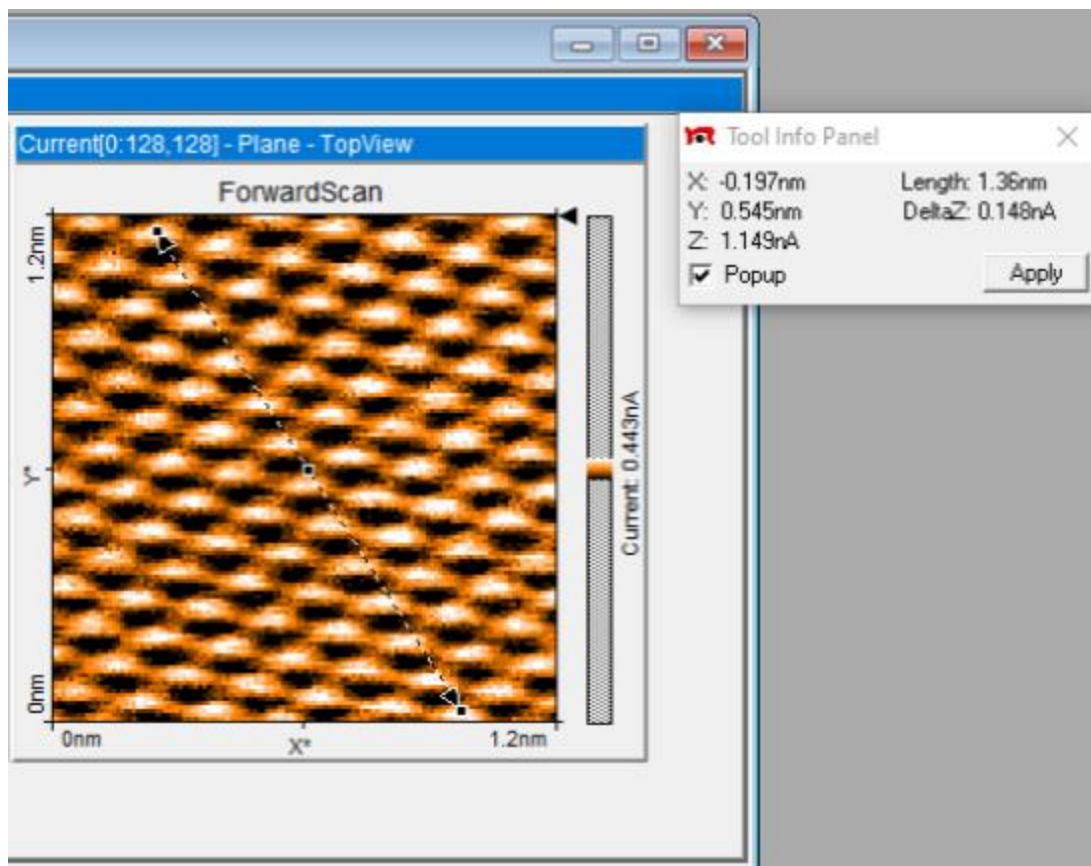
$$\frac{1.19 \pm 0.06}{7} = (0.170 \pm 0.008)[nm] \text{ פה נקבל}$$



איור 14: מדידת מרחק 3, HOPG

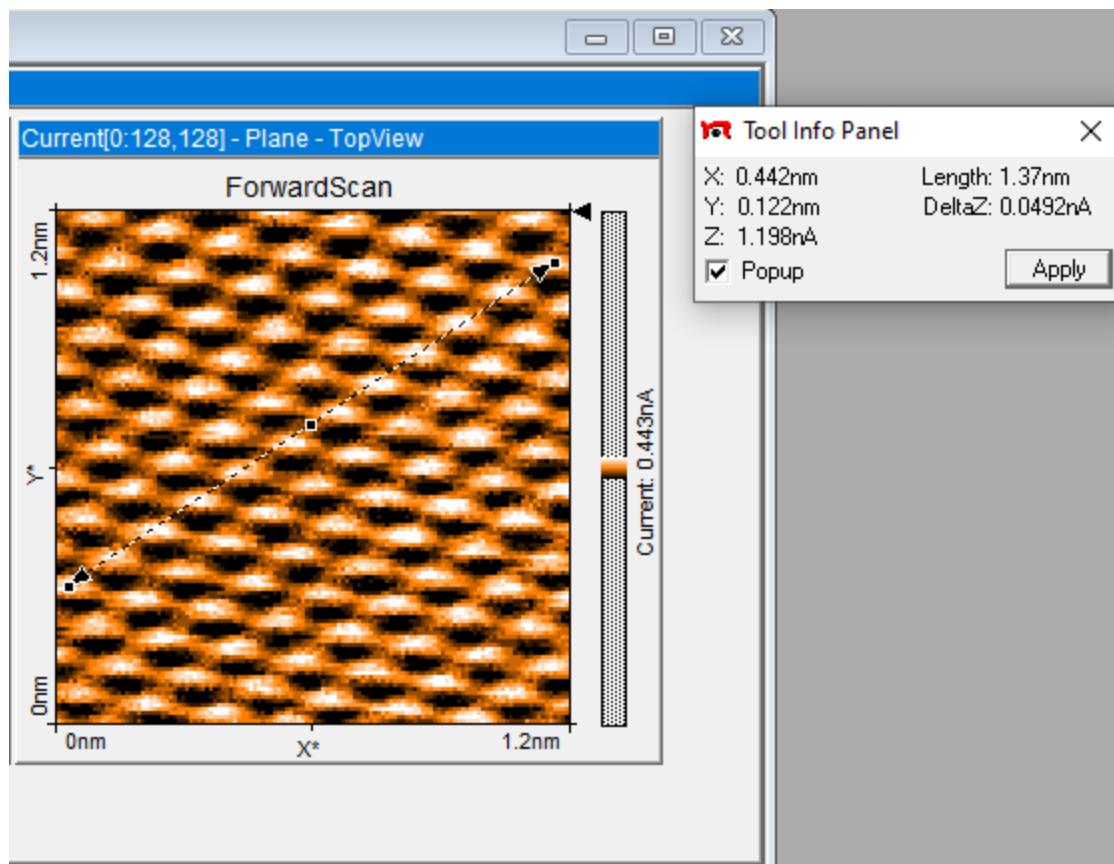
$$\frac{1.01 \pm 0.06}{6} = (0.17 \pm 0.01)[nm] \text{ נקבל}$$





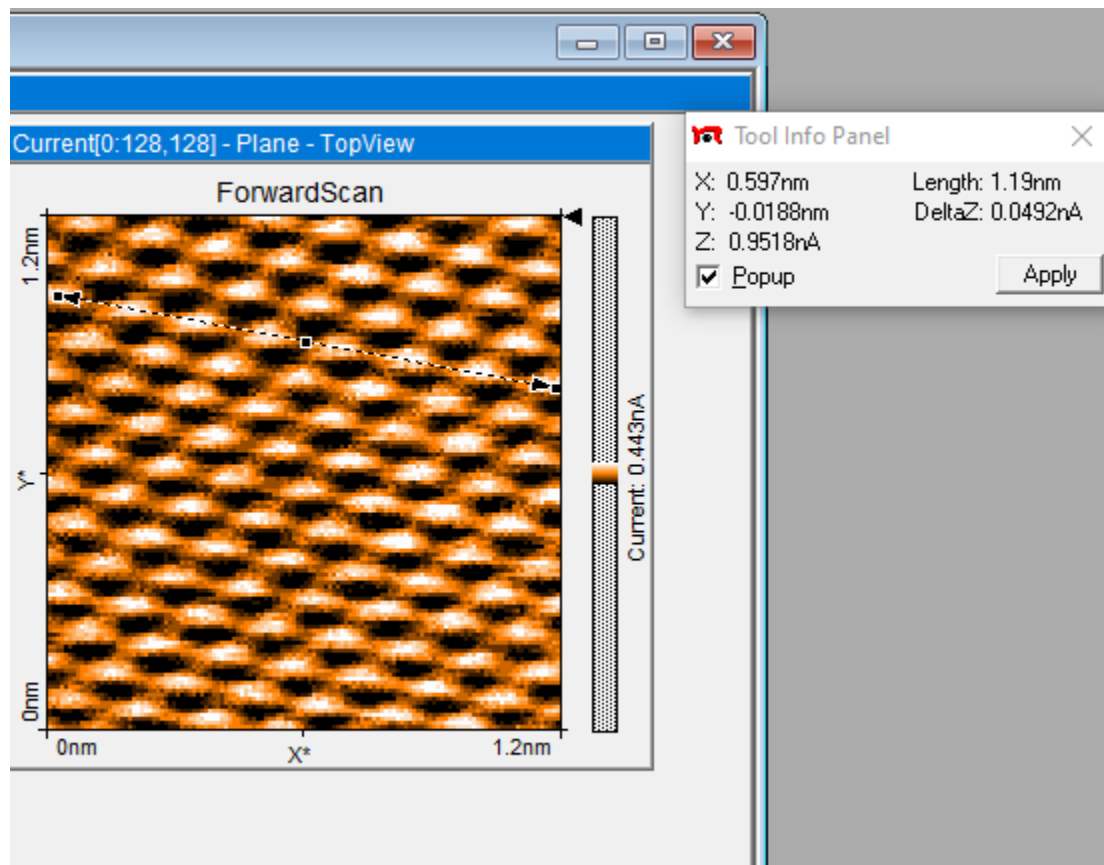
איור 15: מדידת מרחק 4, HOPG

$$\frac{1.36 \pm 0.06}{12} = (0.113 \pm 0.005)[nm] \text{ נקבל}$$



איור 16: מדידת מרחק 5, HOPG

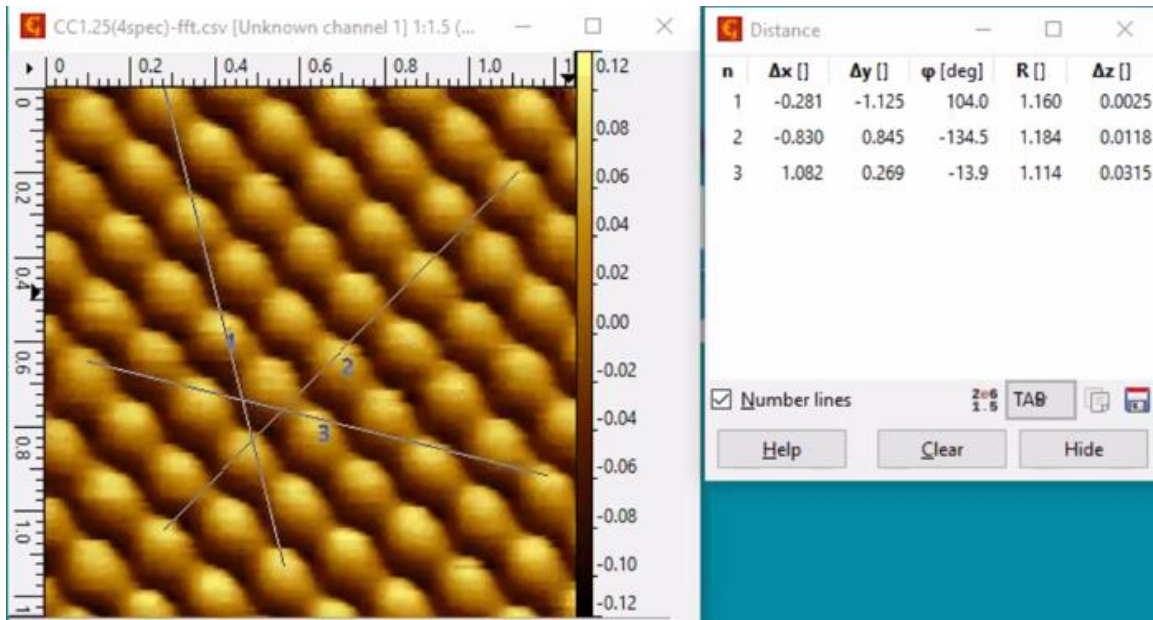
$$\frac{1.37 \pm 0.06}{11} = (0.124 \pm 0.005)[nm] \text{ נקבל}$$



איור 17: מדידת מרחק 6, HOPG

$$\frac{1.19 \pm 0.05}{7} = (0.170 \pm 0.008)[nm]$$

נבצע מדידות לקבוע הסריג השני (הקצר יותר, לפי התיאוריה) ל-2 התמונות:

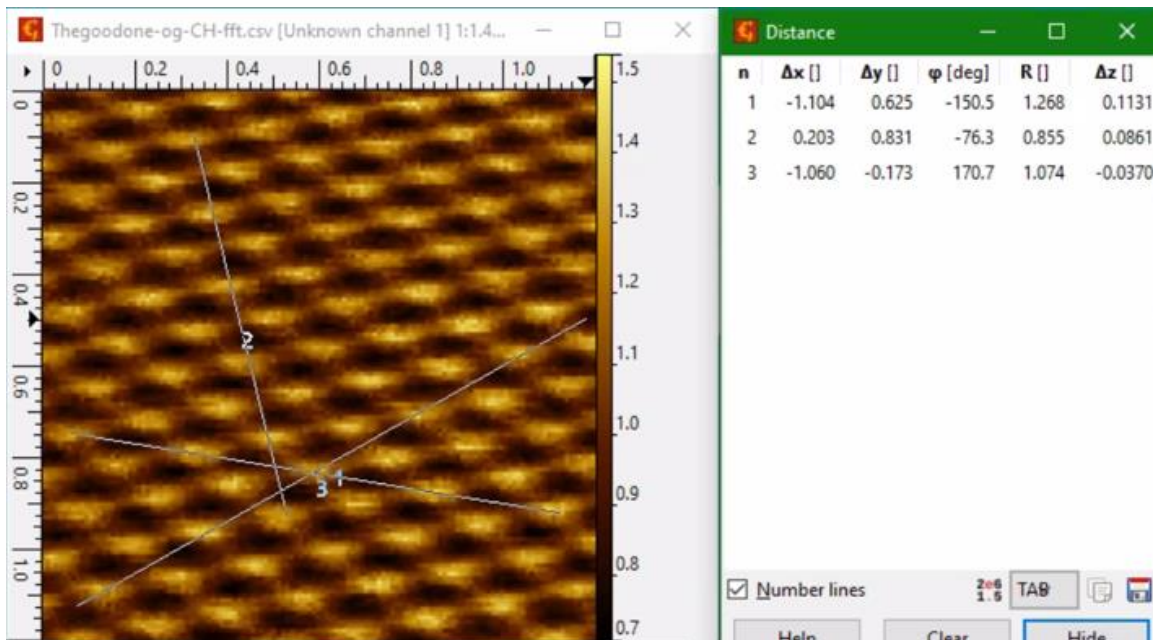


איור 18: מדידות מרחק לקבוע סריג  $a$ , גובה קבוע, HOPG

קיבלנו - עבור 1:  $\frac{1.160 \pm 0.06}{12} = (0.096 \pm 0.005)[nm]$

עבור 2:  $\frac{1.184 \pm 0.006}{12} = (0.098 \pm 0.005)[nm]$

עבור 3:  $\frac{1.114 \pm 0.006}{12} = (0.092 \pm 0.005)[nm]$ . כאשר כל מדידה ממוספרת לפי איור 18 ותואמת לערכים בטבלה מימין באיור.



איור 19: מדידות מרחק לקבוע סריג  $a$ , גובה קבוע, HOPG

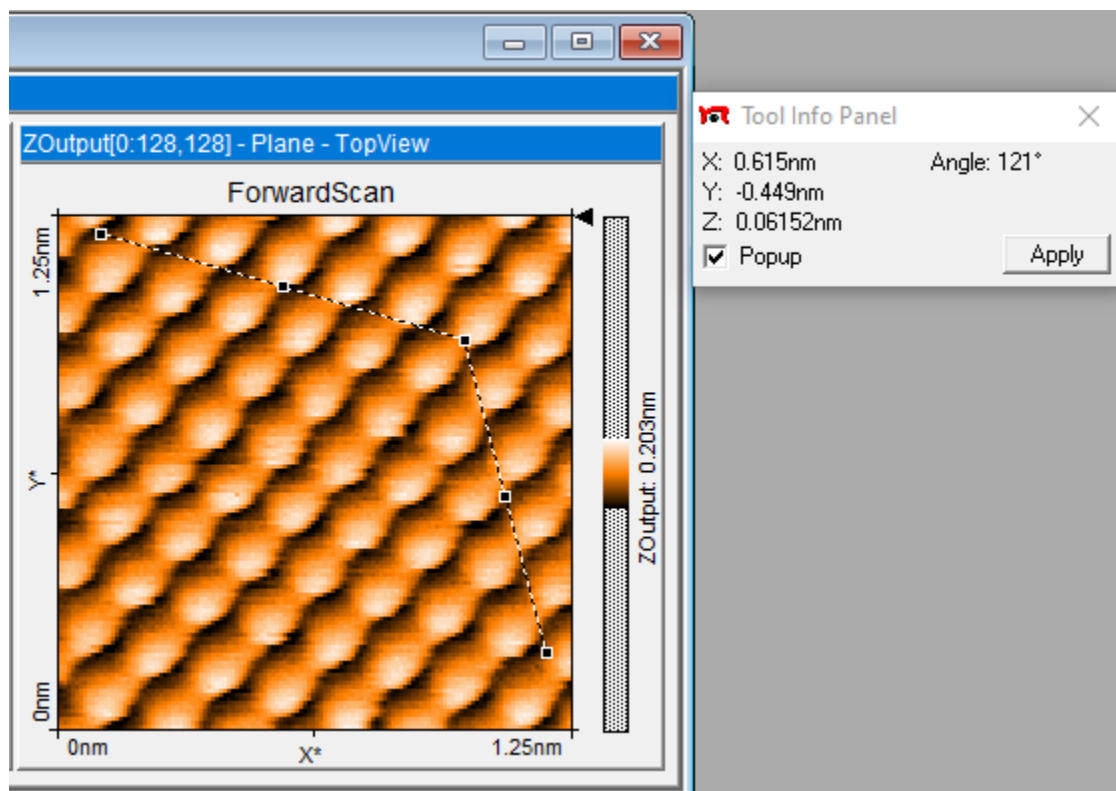
$$\frac{1.268 \pm 0.06}{15} = (0.084 \pm 0.004)[nm] \text{ : עבור 1}$$

$$\frac{0.831 \pm 0.006}{15} = (0.055 \pm 0.004)[nm] \text{ : עבור 2}$$

$$\frac{1.074 \pm 0.006}{12} = (0.089 \pm 0.005)[nm] \text{ : עבור 3}$$

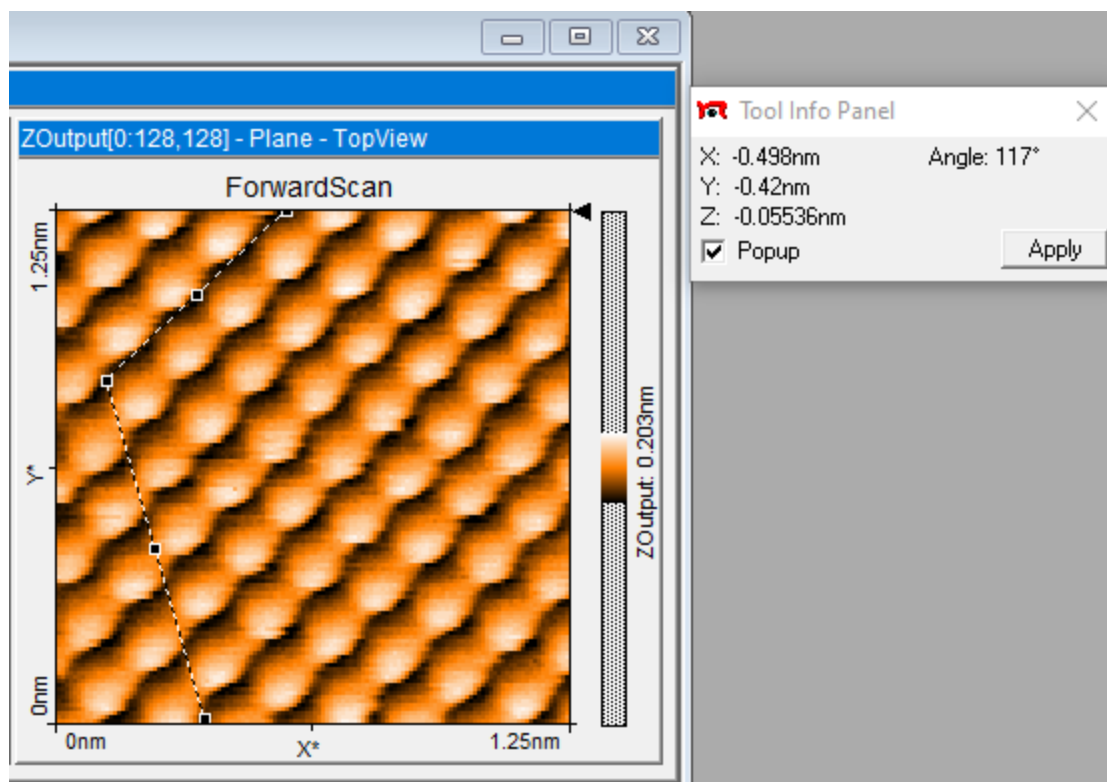
כאשר כל מדידה ממוספרת לפי איור 19 ותואמת לערכים בטבלה מימין באיור.

באופן דומה השתמשנו בתכנה לחישוב הזוויות, כאשר גם כאן השתדלנו למדוד מכיוונים שונים כדי להמנע ממריחת תמונה:



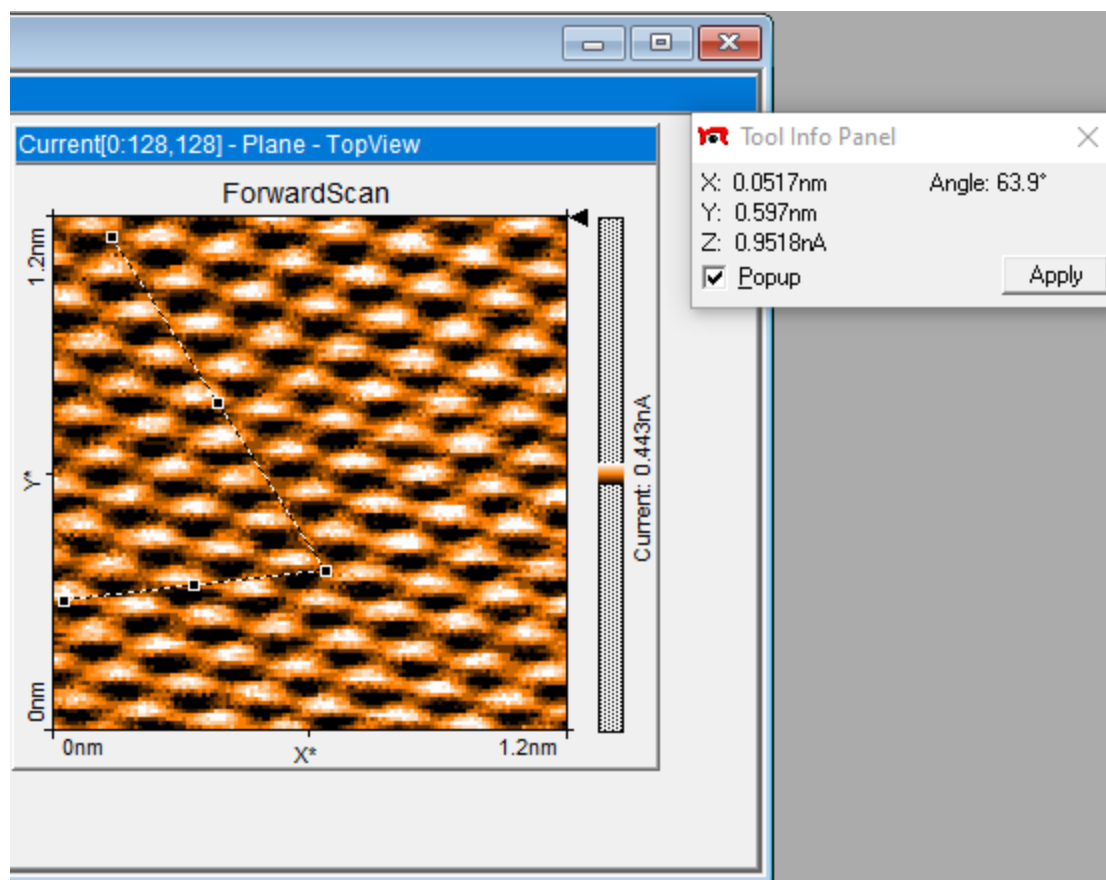
איור 20: מדידת זווית 1, HOPG

$$\text{קיבלנו } (121 \pm 2)^\circ.$$



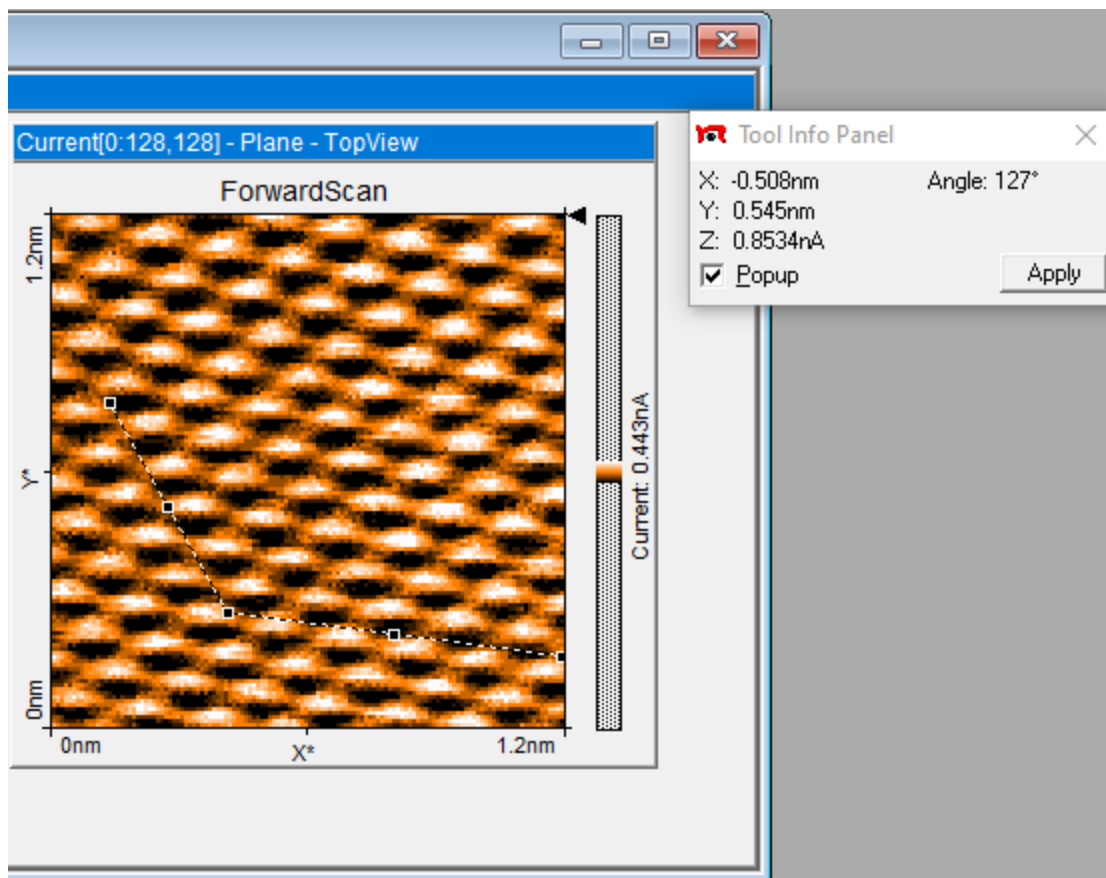
איור 21: מדידת זווית 2, HOPG

קיבלנו  $(117 \pm 2)^\circ$ .



איור 22: מדידת זווית 3, HOPG

קיבלנו  $(127 \pm 4)^\circ$ .



איור 23: מדידת זווית 4, HOPG

קיבלנו  $127 \pm 2^\circ$ .

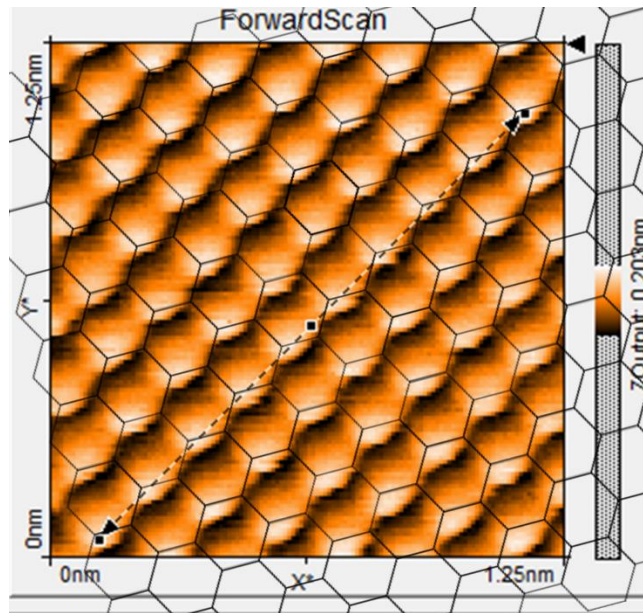
נמצע (מיצוע משוקלל) את התוצאות שלנו (עבור  $a$  קבוע סריג קצר ו- $b$  הארוך, כפי שבפרק 1.5):

שיטה	קבוע סריג $a$ [nm]	קבוע סריג $b$ [nm]	זווית $[\circ]$
זרם קבוע	$0.095 \pm 0.003$	$0.166 \pm 0.004$	$119 \pm 2$
גובה קבוע	$0.074 \pm 0.003$	$0.127 \pm 0.003$	$127 \pm 2$
ערך ספרותי	0.141	0.246	120

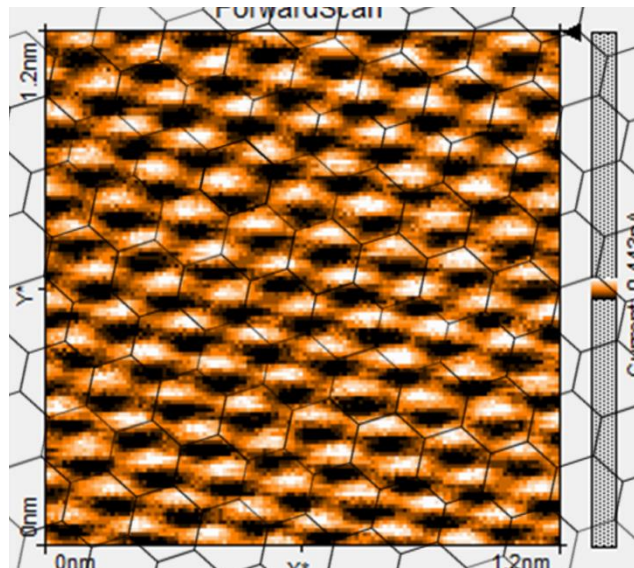
טבלה 1: תוצאות ניסוי 1

נוכל "להלביש" את התמונות של הגובה הקבוע והזרם הקבוע לסריג לו אנו מצפים:





איור 24: התאמת סריג לשיטת זרם קבוע, HOPG



איור 25: התאמת סריג לשיטת גובה קבוע, HOPG

כאשר לפי איור 24 ניתן להשתכנע כי התמונה בשיטת זרם קבוע התקבלה ללא מריחה של התמונה, לעומת איור 25 בו רואים כי יש אי-התאמה ברורה בין הצירים – ניתן לראות כי מימין-לשמאל הסריג בגודל די מתאים לתמונה, בזמן שמלמעלה-למטה רואים כי התמונה הנמדדת קטנה משמעותית מהסריג המודבק.

מסיבה זאת נתייחס לתוצאות של הזרם הקבוע מטבלה 1 כהתוצאה המדויקת ביותר, התוצאה ללא שגיאה סיסטמטית.

## 2.5 דיון בתוצאות ומסקנות

- קיבלנו תוצאות אשר משמעותית קטנות מהערכים הספרותיים (ורחוק מערך האי-ודאות). אנו חושבים כי מדובר בשגיאה סיסטמטית של המכשיר לגבי גודל התמונה/מרחקי הקפיצות של המחט שהוא מראה. בהנחה וזה המצב, נבדוק התאמה בין היחסים של המרחקים שנמדדו כמול הערכים הספרותיים: נתבסס על המדידות המוצלחות, שהן התמונה בשיטת הזרם הקבוע. שם נקבל יחס בין התוצאה הנמדדת לספרותית של  $0.67 \pm 0.02$  עבור קבוע  $a$  ויחס  $0.67 \pm 0.01$  עבור קבוע  $b$ . ניקח להשוואה את המדידות הכי אופקיות במדידת הגובה הקבוע, מכיוון שהמתיחה של התמונה בסריקה הלך וחזור פועלת בכיוון מעלה-מטה. המדידה האופקית ביותר לקבוע סריג  $a$  הינה קו 3 באיור 19, עבורה נקבל יחס תוצאה נמדדת לאמיתית של  $0.63 \pm 0.03$  ומאיור 17 העונה למדידה הכי אופקית של קבוע  $b$  נקבל יחס  $0.69 \pm 0.03$ . מכאן קל להשתכנע כי היחס נשמר בשתי התמונות השונות וכי כנראה מדובר בשגיאה סיסטמטית של אותו פקטור  $0.67 \pm 0.1$ .
- אחרי חילוק באותו פקטור תיקון ולקיחת מדידת הזרם הקבוע כתוצאה המדויקת ביותר, דיוק המדידה שלנו הינו  $a = (0.141 \pm 0.002)[nm]$ ,  $b = (0.246 \pm 0.002)[nm]$ ,  $\theta = (119 \pm 2)^\circ$ . כאשר ברור שתוצאות האורכים כוילו לערך הספרותי, אך בדקנו שערך הכויל מתאים לתמונה אחרת וזה מדגיש את ההתאמה ביחס בין  $a$  ל- $b$ .
- נוכל אלטרנטיבית, למצע את פקטור השגיאה הסיסטמטית משתי המדידות האופקיות מהנקודה הראשונה, נקבל פקטור  $0.66 \pm 0.02$  ואז על ידיו לקבל תוצאות לשיטת הזרם הקבוע:  $a = (0.139 \pm 0.003)[nm]$ ,  $b = (0.242 \pm 0.003)[nm]$ . עם התאמות  $t$ -value של:  $t_a = 0.66[\sigma]$ ,  $t_b = 1.3[\sigma]$  ו- $t_\theta = 0.5[\sigma]$ .
- ניתן לראות בבירור לפי איורים 24 ו-25 כי הסריקה בשיטת זרם קבוע הייתה מוצלחת יותר – ללא מריחה של התמונה. נוכל לאשש זאת גם מספרית לפי העובדה שבמדידת המרחק, כל כיוון מדידה בזרם הקבוע נתנה תוצאה דומה (ביחס לאי-ודאויות), בזמן שהמדידה לגובה קבוע נתנה תוצאות שונות משמעותית בין הכיוונים השונים – מרחקים קצרים מדי ככל שהיטל המדידה על ציר  $y$  גדול יותר. אמירה זו נכונה לשתי קבועי הסריג שנמדדו. מה שמסכים עם היוזואליזציה באיורים 24 ו-25. בנוסף נבחין כי גם הזוויות לשיטת גובה קבוע יצאו רחוקות משמעותית מהערך הספרותי וביחס לתוצאות הטובות של שיטת הזרם הקבוע.
- את המריחה בשיטת הגובה הקבוע ניתן לייחס לאפקט ההיסטרזיס יותר מאשר השיטה עצמה, כפי שלדוגמא איורים 8 ו-9 נעשו בשיטת זרם קבוע ועדיין יש שם מריחה ברורה. מה שמייחד את איור 11 (המדידה הטובה) הינו פרמטר  $Time/Line$  אשר היה  $1.5[s]$  לעומת ה- $2[s]$  שהיה לשאר המדידות. והרי זו תופעה מוכרת במערכות STM (לדוגמא מופיע ב-[10] ובספרים [3][4][5]) שמומלץ להוריד פרמטר זה על מנת להוריד את אפקט ההיסטרזיס, כפי שפחות זמן לשורה נותן פחות זמן לפלקטואציות התרמיות להשפיע על המדידה.
- לולאת המשוב בשיטת הגובה הקבוע נשארה דלוקה (אך בפרמטרים נמוכים, כפי שמופיעים בתיאור מהלך הניסוי) בשביל להקטין השפעה של פלקטואציות תרמיות במערכת [6].
- ניתן לחשוב כי על ידי חישוב הבדלי הגבהים המקסימלי בין הנקודות החשוכות ביותר לבהירות ביותר, בשיטת הזרם הקבוע, ניתן לחשב את קבוע הסריג השלישי. קבוע זה מבטא את המרחק בין בשכבות, עבורו הערך הספרותי  $c = 0.340[nm]$ . אצלינו, לפי המדד באיור 19, מצד ימין, ניתן לראות כי נמדד  $c = 0.203[nm]$ . אין זה מפתיע שהתוצאה אינה תואמת את הערך המצופה מ-2 סיבות עיקריות – השכבה התחתונה אינה יושבת בדיוק מתחת לתחתונה כמתואר בתיאוריה (וזו סטייה

שאין לנו מספיק נתונים למדוד) וכי זרם ייקלט במחט מעננת האלקטרונים שמסביבו ולא רק מתחתיו, מה שדורש טיפ בחדות גבוהה יותר (ובכך, תמונה ברורה יותר) על מנת שכמה שפחות אלקטרונים יעברו מנהור מהעננה מסביב ושרובם המוחלט יהיה מהאטום בשכבה התחתונה. לפי חוסר התאימות בתוצאה לקבוע סריג זה ולפי איכות התמונות הכי טובות שלנו, שגם בהן רואים בבירור מריחה של צפיפות האלקטרונים, ניתן להסיק כי איכות הטיפ והמדידה שלנו אינה מספיקה לקבוע מרחק בין שכבות.

### 3. ניסוי מספר 2: ספקטרוסקופיית HOPG

#### 3.1 מטרות הניסוי

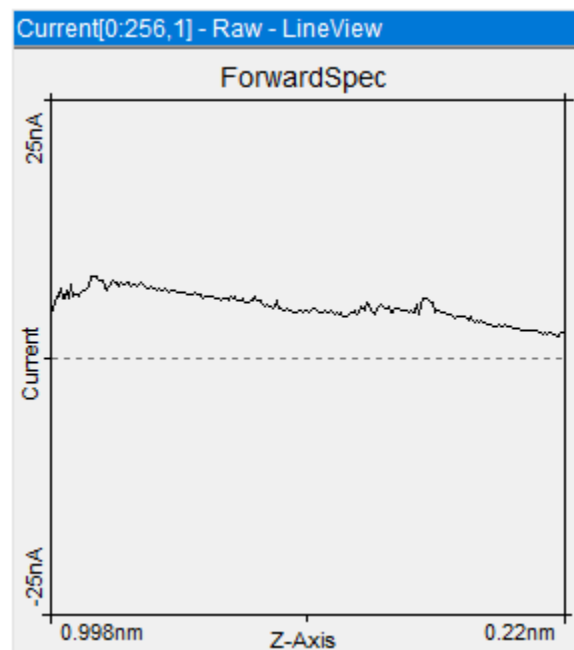
ביצוע ספקטרוסקופיה על HOPG והסקת תכונותיו החשמליות לפי התאמה לתוצאות מוכרות.

#### 3.2 תיאור המערכת ומהלך הניסוי

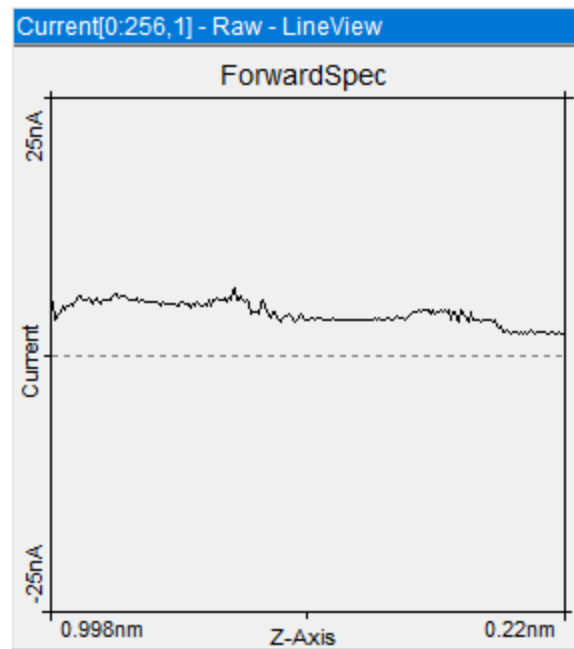
המערכת זהה לתיאור בפרק 1.2. לקחנו מדידה ברורה, ברזולוציה נמוכה ממוד סריקה של זרם קבוע מהניסוי הקודם. פתחנו את עמוד הספקטרוסקופיה וביצענו מדידת ספקטרוסקופיה במוד 'point' על נקודה בהירה בטווח מתחים של  $[-0.5, 0.512][\text{Volt}]$  עבור מדידות הזרם כתלות במתח  $(I(V))$ . עבור מדידת הזרם כתלות במרחק  $(I-z)$  עבדנו בטווח של  $[0.998, 0.22][\text{nm}]$ .

#### 3.3 תוצאות הניסוי

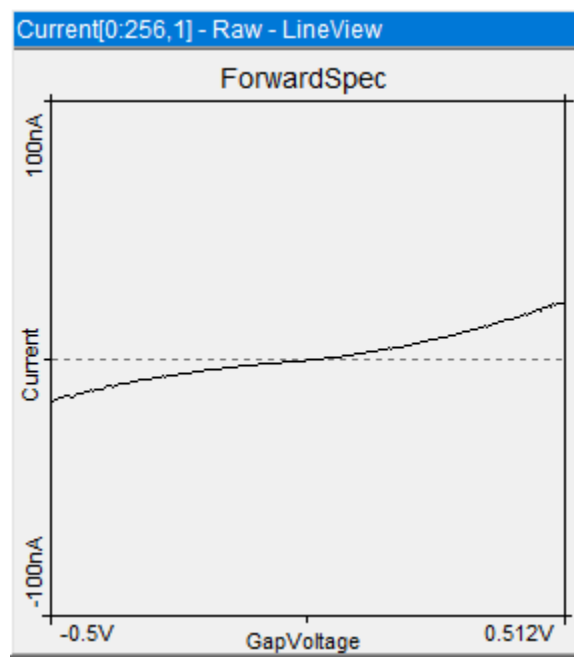
המדידה שנבחרה לביצוע הספקטרוסקופיה הינה המדידה העונה לאיור 11. עבור נקודות שונות באותה התמונה קיבלנו את התוצאות הבאות:



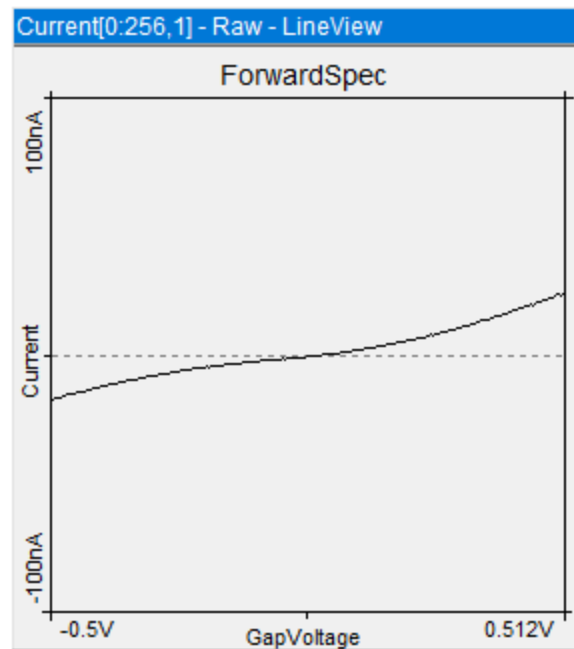
איור 26: מדידת I-z, HOPG, 1



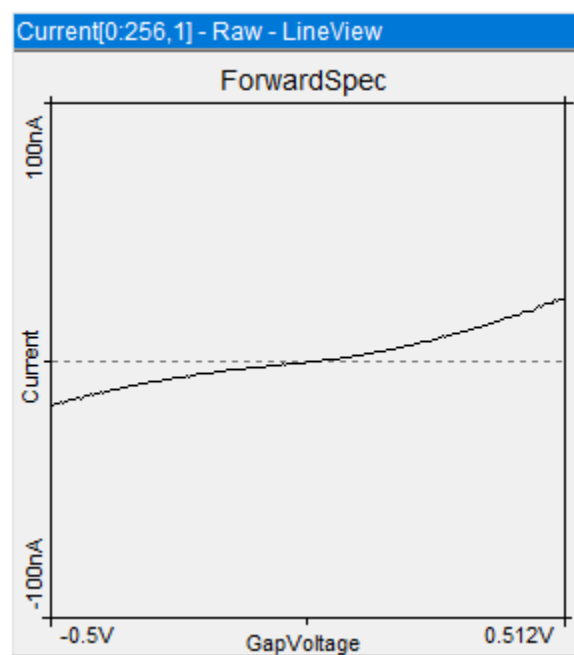
איור 27: מדידת I-z, HOPG ,2



איור 28: מדידת I-V, HOPG ,1



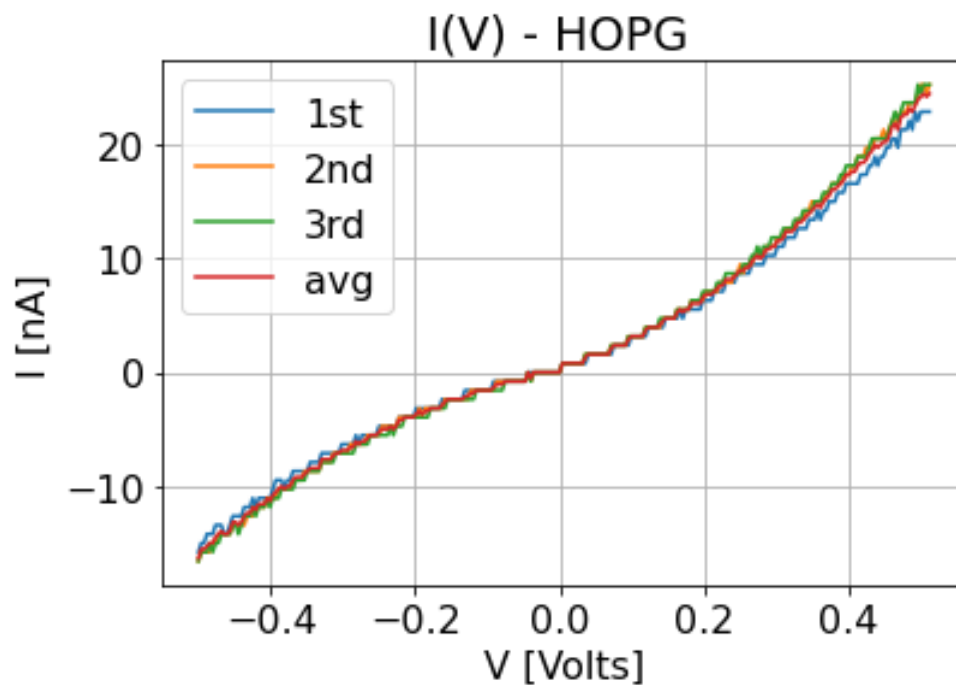
איור 29: מדידת I-V, HOPG, 2



איור 30: מדידת I-V, HOPG, 3

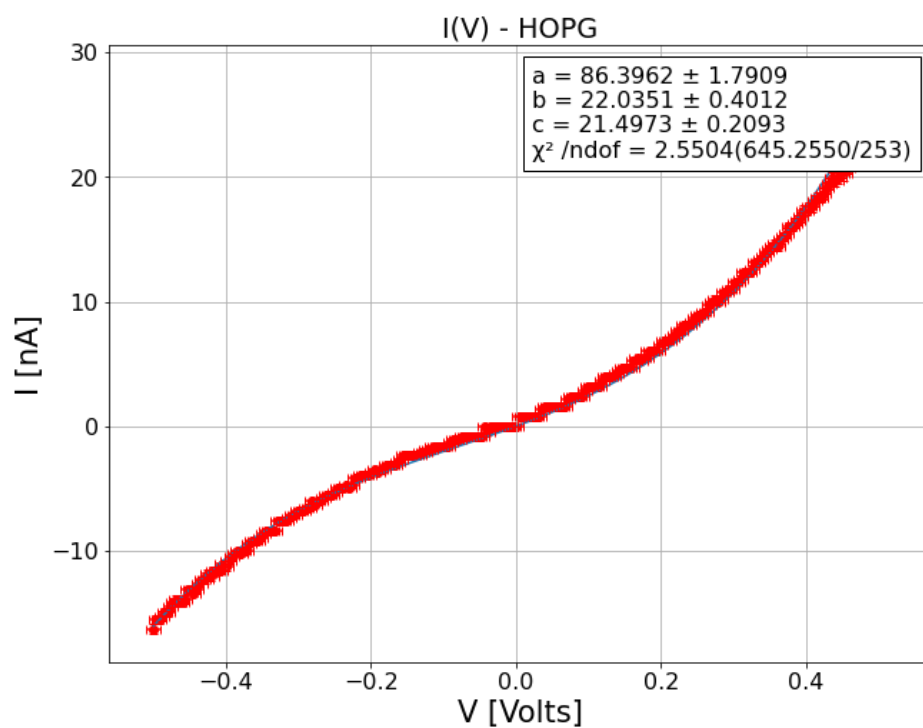
### 3.4 עיבוד התוצאות

לקחנו את איורים 28, 29 ו-30, הצגנו אותם על גרף אחד, יחד עם ממוצעים:



איור 31: תוצאות I-V עבור HOPG

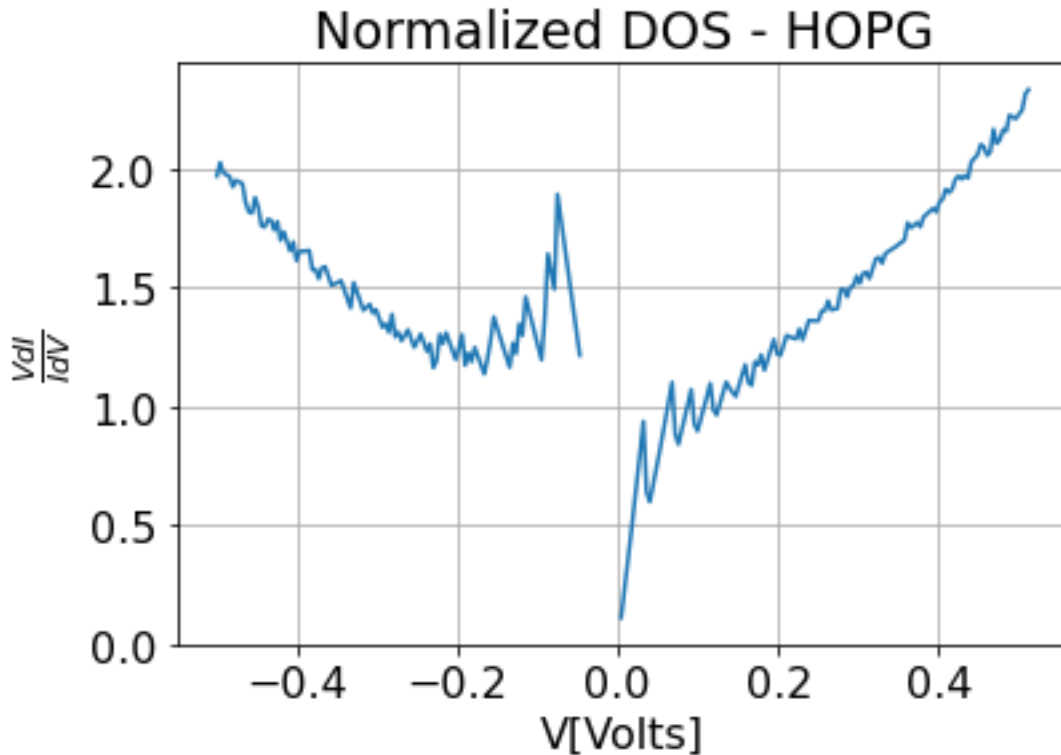
ביצענו התאמה לפולינום מדרגה שלישית לערך הממוצע מאיור 31. ההתאמה ל- $y = ax^3 + bx^2 + cx$ :



איור 32: התאמה לפולינום למדידות I-V, HOPG

ביצענו גזירה אנליטית לפולינום שהתקבל מההתאמה באיור 32 וקיבלנו:  $3ax^2 + 2bx + c = 259.19x^2 + 44.07x + 21.50$ . תוצאה זו הינה  $\frac{dI}{dV}$ .

מפה ייצגנו את  $V/I$  שנמדדו כפול הערך התואם מהפולינום שהתקבל, לפי משוואה (3):



איור 33: הצגת  $\frac{V}{I} \cdot \frac{dI}{dV}$  HOPG

כאשר ניתן לציין ששתי נקודות משמאל ל-0.0 באיור 33 שנראות חסרות, אינן מופיעות משום שהייתה התבדרות בנקודות אלו (נמדד זרם אפסי).

מפה יש להשוות תוצאה זו לאיור 2, בעמודה של ה-semi-metal, מה שנעשה בדיון.

### 3.5 דיון בתוצאות ומסקנות

- קיבלנו התאמה די טובה לפולינום, לפי מדד  $\frac{\chi^2}{ndof} = 2.5$ . בנוסף ניתן לציין כי המדידות

השונות הראו תוצאות קרובות זו לזו, כנראה באיור 31.

- פרט לנקודת החיבור, בה יש בעיית התבדרות בעקבות הקירוב הנומרי, ניתן לראות כי

התנהגות  $\frac{V}{I} \cdot \frac{dI}{dV}$  תואמת למצופה מאיור 2. לפי הדעיכה לפני נקודת החיבור והעלייה אחרי, יחד

עם החוסר ב"רווח" שמופיע במוליכים.



- ספקטרוסקופיית  $I(z)$  משמשת למדד לאיכות הטיפ או למציאת פונקציית העבודה הנקודתית האפקטיבית (כתלות בדגימה ובטיפ) בסריקה. ממשוואה (2) ניתן לקשר בין פונקציית העבודה המקומית למקדם עלייה אקסופוננציאלי (עלייה אם מתקרבים, דעיכה אקסופוננציאלית אם מתרחקים) שהיינו אמורים לקבל מהתאמה לאקספוננט עולה לאיורים 26, 27 [10], אך לא הצלחנו לקבל עלייה אקסופוננציאלית במדידה, לכן לא יכולנו לבצע את החישוב.

#### 4. ניסוי מספר 3: סריקת זהב

##### 4.1 מטרות הניסוי

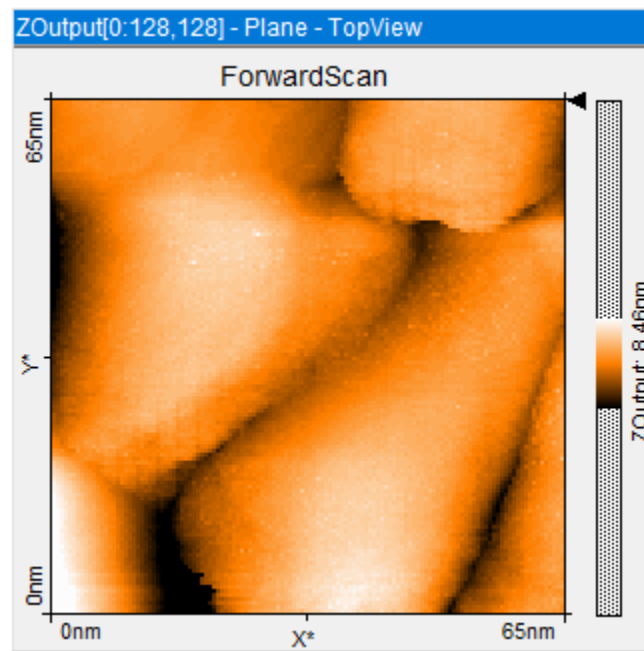
סריקת מבנה זהב Au ומדידת מימדיו – קבועי סריג וזוויות.

##### 4.2 תיאור המערכת ומהלך הניסוי

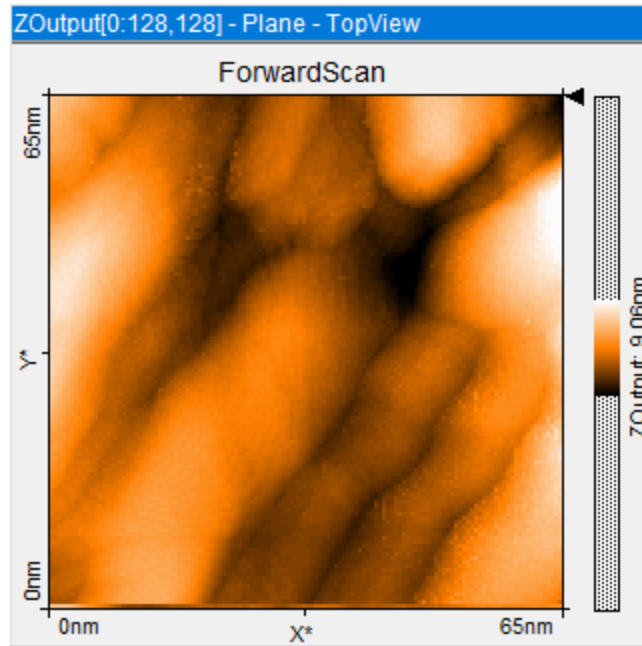
המערכת זהה לתיאור בפרק 1.2. מהלך הניסוי זהה למהלך ניסוי 1 (פרק 2) פרט להחלפת דגימת ה-HOPG בדגימת זהב.

##### 4.3 תוצאות הניסוי

להלן התוצאות שנמדדו במוד זרם קבוע:



איור 34: זהב ברזולוציה  $65[nm]$ , זרם קבוע, הלוך



איור 35: זהב ברזולוציה  $[65\text{nm}]$ , זרם קבוע, חזור

כאשר במוד גובה קבוע, לא התקבלה אף תמונה אחת ברורה, לא משנה כמה ניסינו.

#### 4.4 דיון בתוצאות ומסקנות

- לא התקבלו תוצאות ברורות אותן ניתן לעבד.
- תוצאה זו ניתן להסביר על ידי העובדה שבזהב האלקטרוניים צפופים יותר ומפולגים הומוגנית יותר. לכן נדרשת סריקה רגישה יותר. ניתן להעריך מספרית, צפיפות האלקטרוניים של גרפיט הינה  $2.25 \left[ \frac{gm}{cc} \right]$  לפי [9] לעומת זהב עם  $15.5 \left[ \frac{gm}{cc} \right]$  לפי [8]. זאת אומרת הבדל בכמעט סדר גודל ביניהם.
- הבדלי הצבעים באיור 35 בכל זאת מלמדים אותנו על הפרשי צפיפות המטען בדגימת הזהב שסרקנו.

## 5. ניסוי 4: ספקטרוסקופיית זהב

### 5.1 מטרת הניסוי

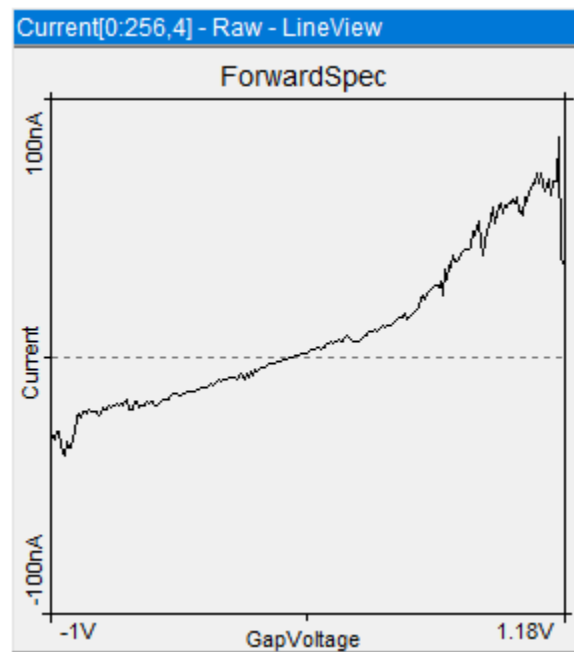
ביצוע ספקטרוסקופיה על זהב (Au) והסקת תכונותיו החשמליות לפי התאמה לתוצאות מוכרות.

### 5.2 תיאור המערכת ומהלך הניסוי

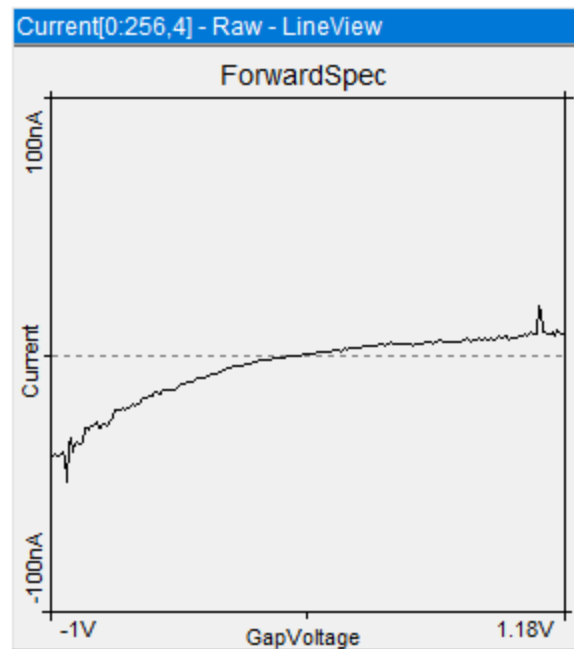
מערכת הניסוי זהה לזו המתוארת בפרק 1.2. לקחנו מדידה ברורה, ממוד סריקה של זרם קבוע מהניסוי הקודם. פתחנו את עמוד הספקטרוסקופיה וביצענו מדידת ספקטרוסקופיה במוד 'line' על קו בהיר בטווח מתחים של  $[-1, 1.18][\text{Volt}]$

### 5.3 תוצאות הניסוי

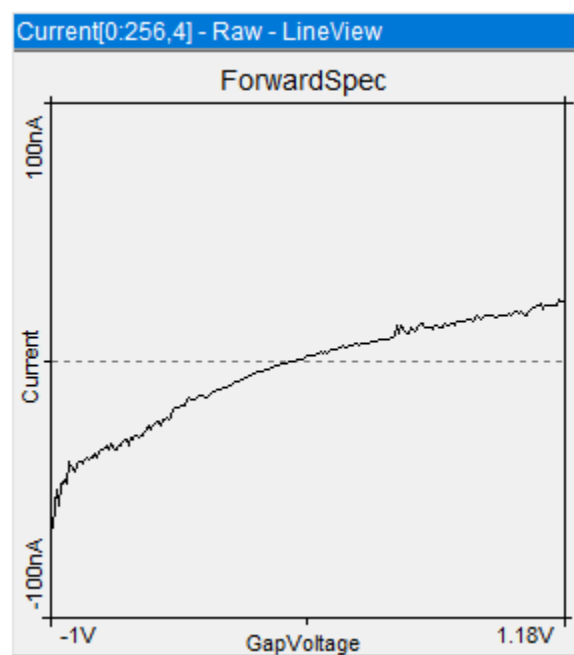
המדידה עברה בחרנו לבצע את הספקטרוסקופיה הינה המדידה העונה לאיור 34. עבור נקודות שונות על מדידה זו קיבלנו את הספקטרוסקופיות הבאות:



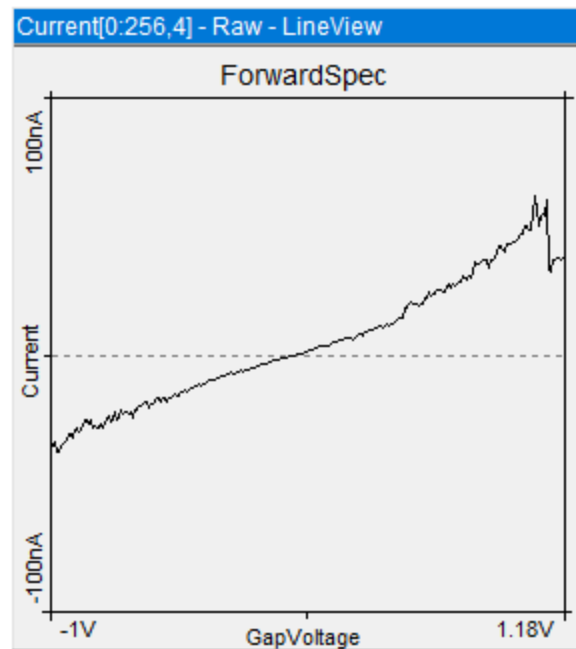
איור 36: מדידת I-V, זהב



איור 37: מדידת I-V, זהב



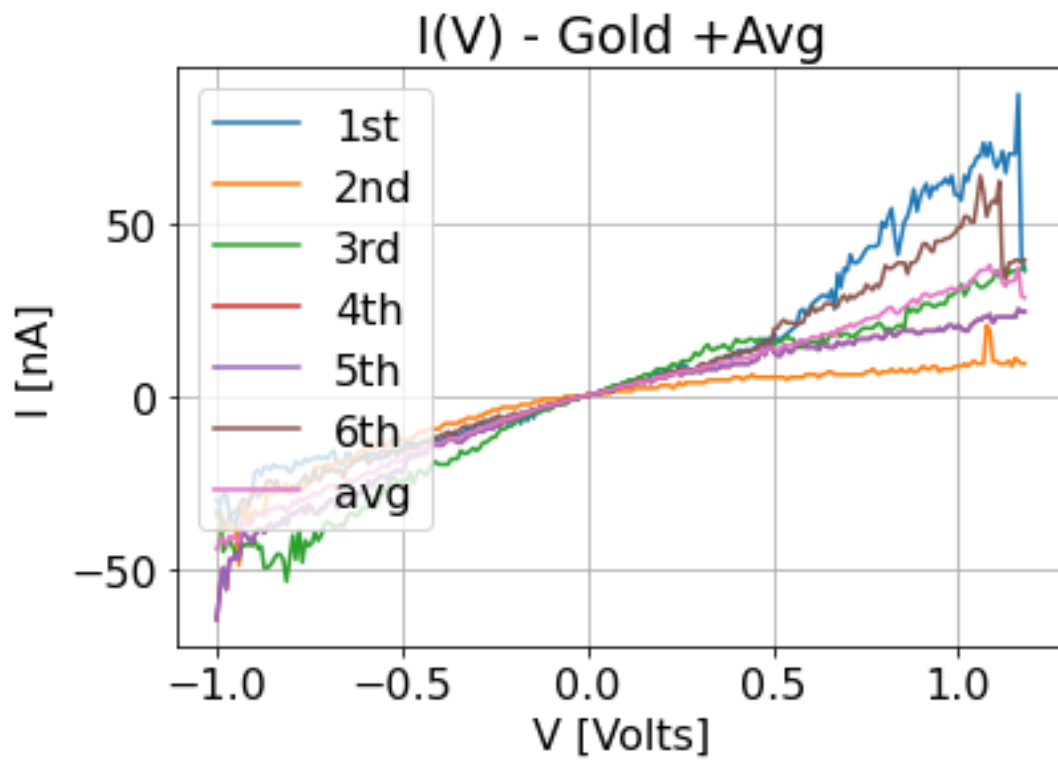
איור 38: מדידת I-V, זהב



איור 39: מדידת I-V, זהב

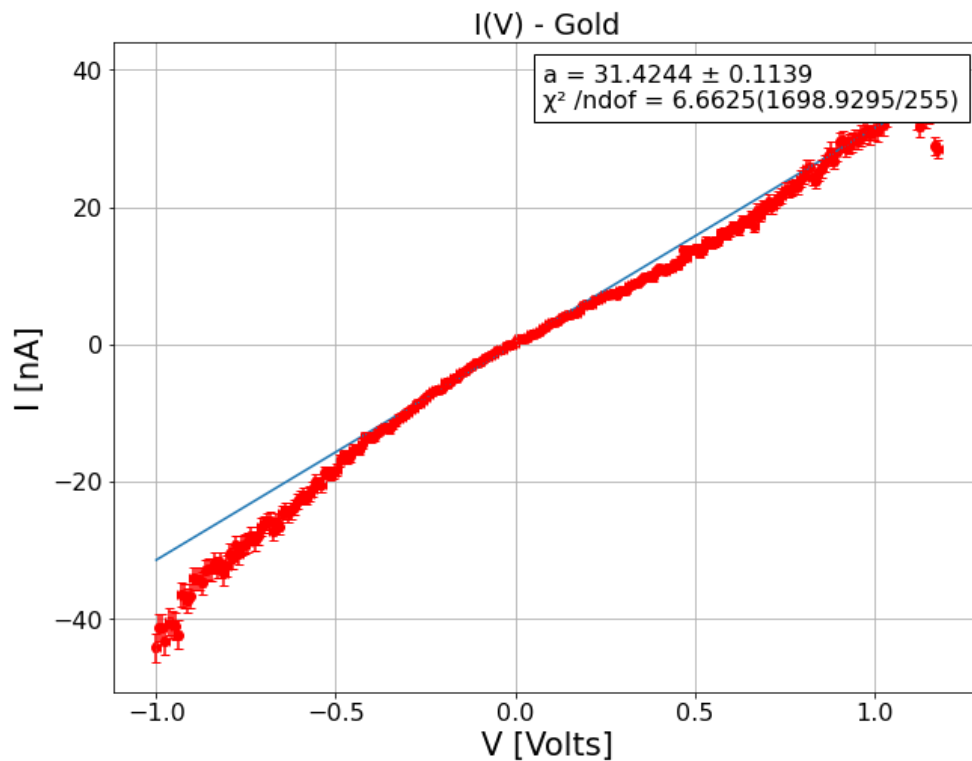
#### 5.4 עיבוד תוצאות הניסוי

נציג את המדידות ביחד ונבצע ממוצע:



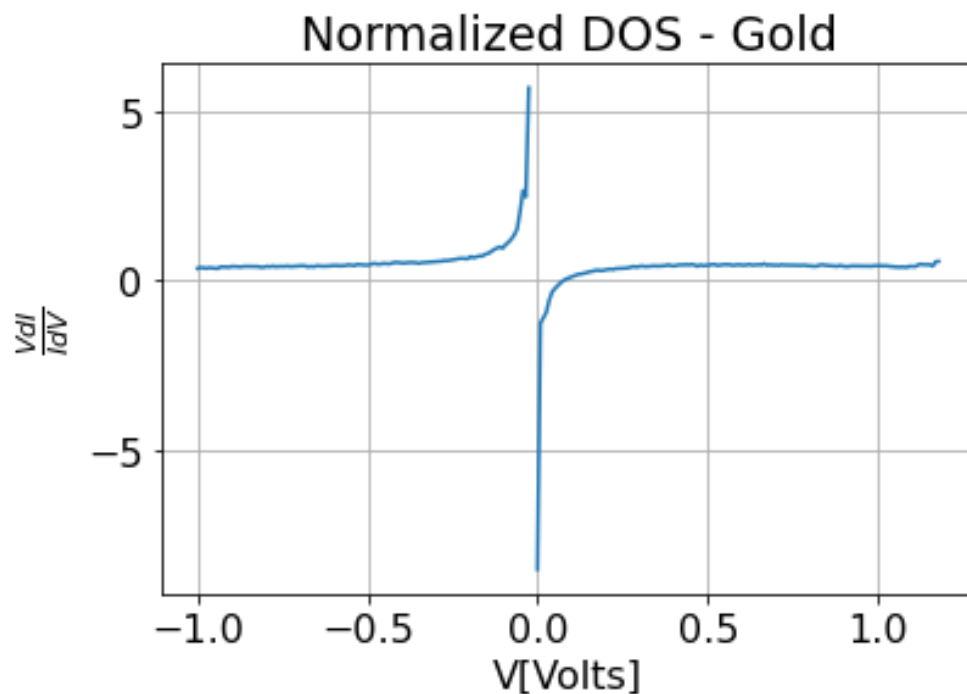
איור 40: תוצאות ספקטרוסקופיה, זהב

לערכי הממוצע נבצע התאמה לינארית לפונקציה  $y = ax$ :



איור 41: התאמה לינארית לזרם כתלות במתח, זהב

נגזור את הפולינום ונקבל קבוע  $31.4 \pm 0.1$ . לפי הכפלה בקבוע זה, נבצע התאמה ל- $\frac{V}{I} \cdot \frac{dI}{dV}$ :



איור 42: הצגת  $\frac{V}{I} \cdot \frac{dI}{dV}$ , זהב

מפה יש להשוות תוצאה זו לאיור 2, בעמודה של ה-metal, מה שנעשה בדיון.

### 5.5 דיון בתוצאות ומסקנות

- קיבלנו התאמה סבירה לפולינום, לפי  $6 \cong \frac{\chi^2}{ndof}$  כאשר רואים בבירור שיש בעיה במדידות משמאל (איור 41) אשר לא יושבים טוב על ההתאמה.
- איור 42 מראה התאמה טובה לעמודה של ה-metal לפי ההתנהגות הלינארית ונקודת החיבור.



## 6. ניסוי 5: ניסוי הרחבה – מדידת סריג הופכי ל-HOPG

### 6.1 מטרת הניסוי

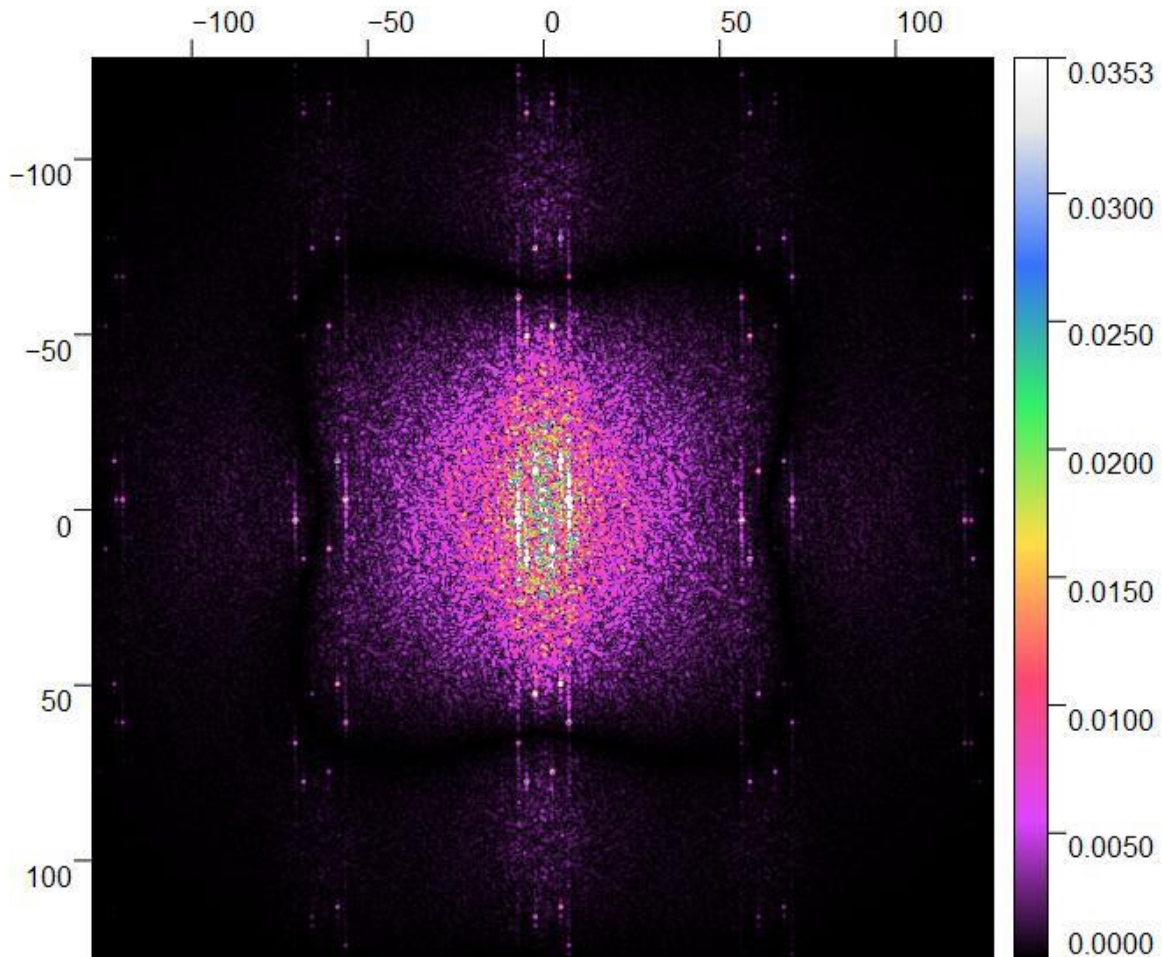
מדידת סריג הופכי של גרפיט HOPG וקביעת קבועי הסריג ההופכי שלו.

### 6.2 תיאור המערכת ומהלך הניסוי

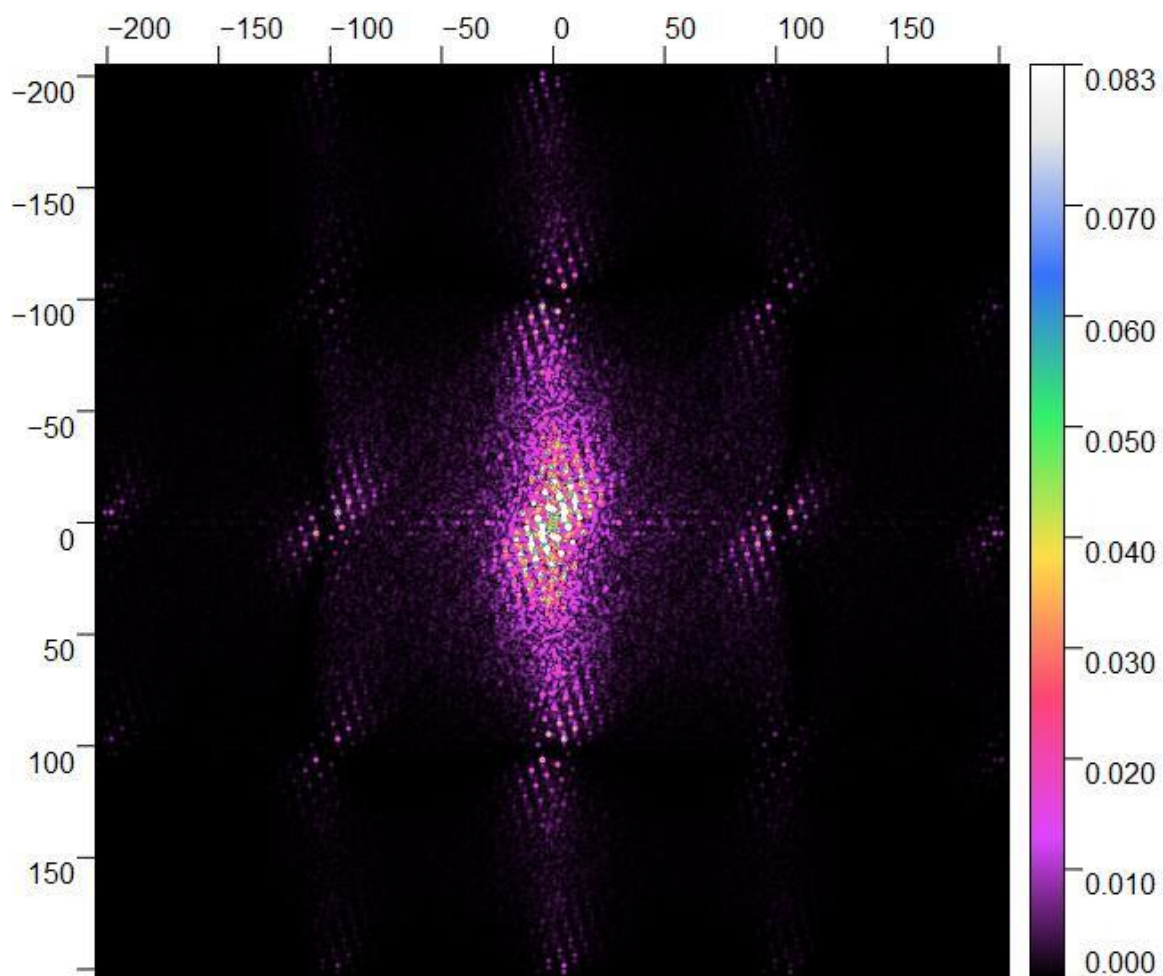
לקחנו תמונה ברורה מניסוי 1 (פרק 2) של HOPG וביצענו התמרת FFT בצורה ממוחשבת דרך תכנת Gwyddion לקבלת סריג הופכי.

### 6.3 תוצאות הניסוי

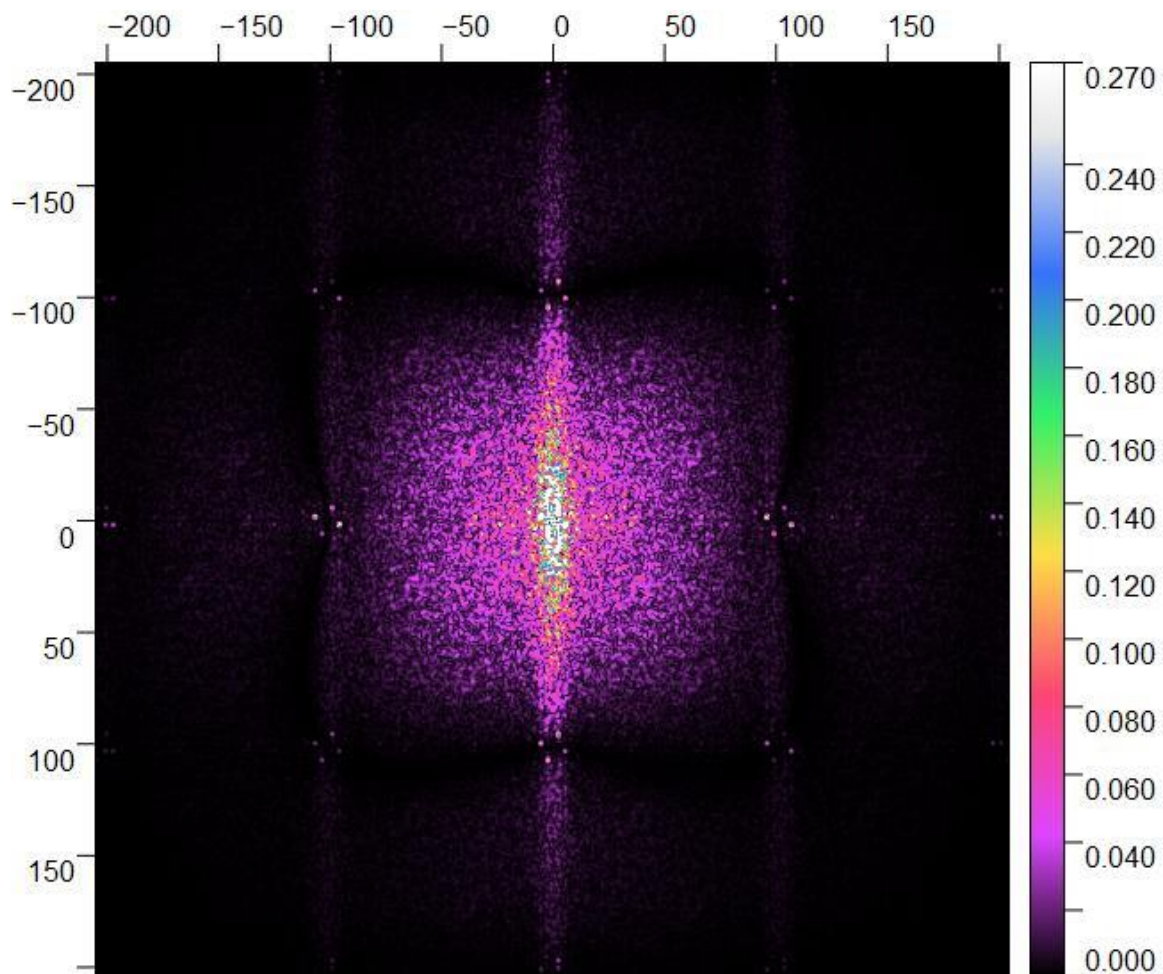
בחרנו בנתונים התואמים לאיורים 10, 11 ואיורים בנספחים 11.1, 11.2 וקיבלנו מהתכנה לאחר ההתמרה:



איור 43: סריג הופכי 1 - עבור המדידה באיור 11.2 (נספחים).



איור 44: סריג הופכי 2 – עבור המדידה באיור 11.

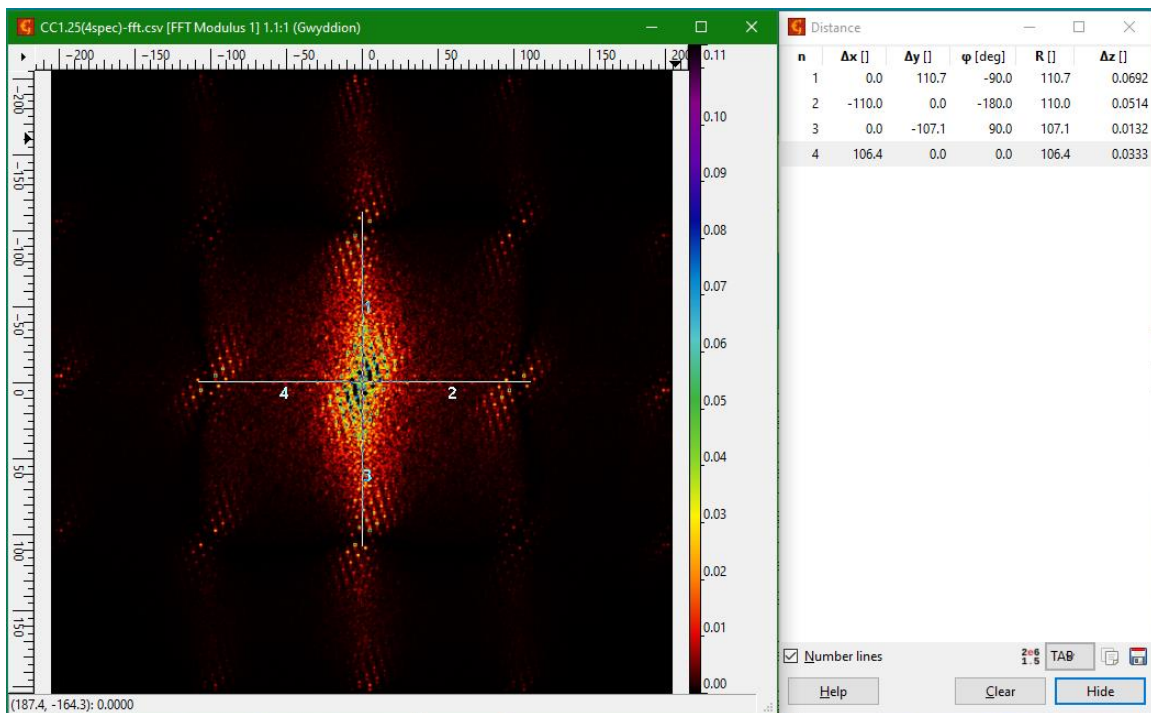


איור 45: סריג הופכי 3 – עבור המדידה באיור 11.1 (נספחים).

#### 6.4 עיבוד תוצאות הניסוי

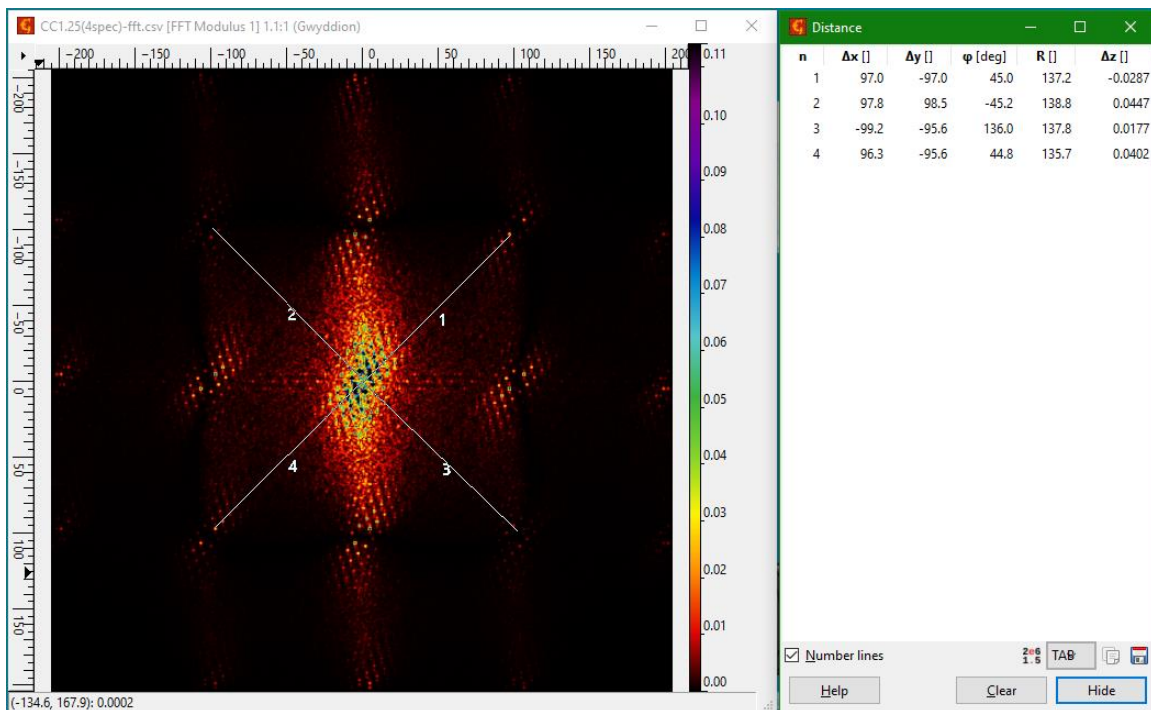
בחרנו את הסריג ההופכי התואם לאיור 11, בגלל שהוא נתן את התוצאות המיטביות לסריג במרחב המיקום ובנוסף נתן את תמונת הסריג ההופכי הברורה ביותר.

חישבנו את הרחקים האנכיים/אופקיים ואת המרחקים האלכסוניים מהתמונה שהתקבלה:



איור 46: מדידת מרחקים אופקיים/אנכיים

נקבל לאחר מיצוע:  $d_{near} = (108 \pm 2)[nm^{-1}]$

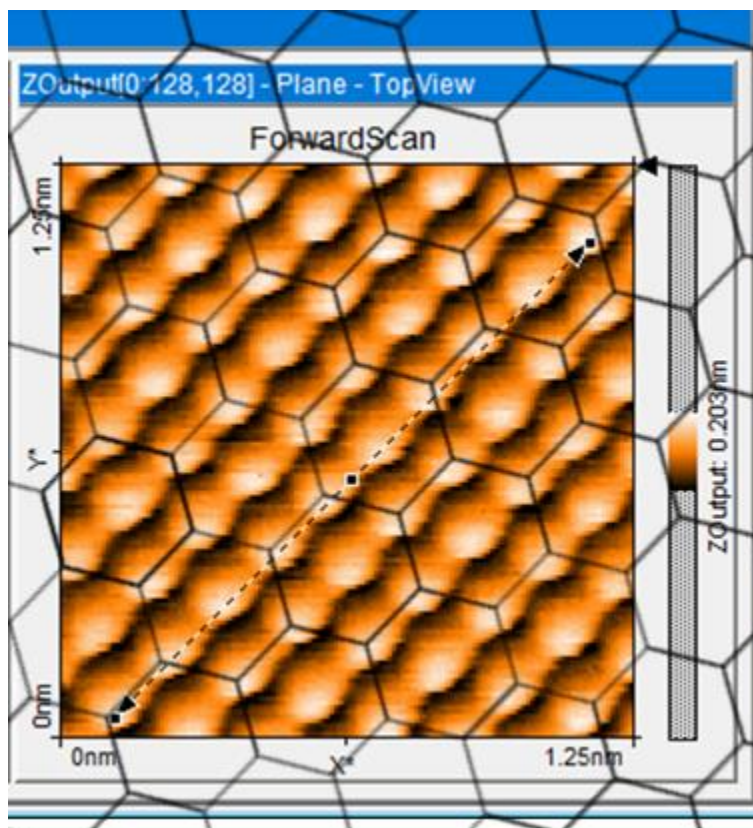


איור 47: מדידת מרחקים אלכסוניים



לאחר מיצוע:  $d_{diag} = (137 \pm 2)[nm^{-1}]$ .

לחישוב התוצאה שנצפה לה, נתחשב תחילה בעובדה שהסריג שמחשב מקבל לפני חישוב ה-FFT הינו סריג שבו הוא רואה אטומים בעיקר ב'נקודות הלבנות' ומתעלם מהאחרות, לאילוסטרציה:



איור 48: הסריג האפקטיבי להתמרה

הסריג ההופכי שמתקבל למשושים כאלה, גם עם אטום באמצע, הוא הקסגונאלי ויראה כך:

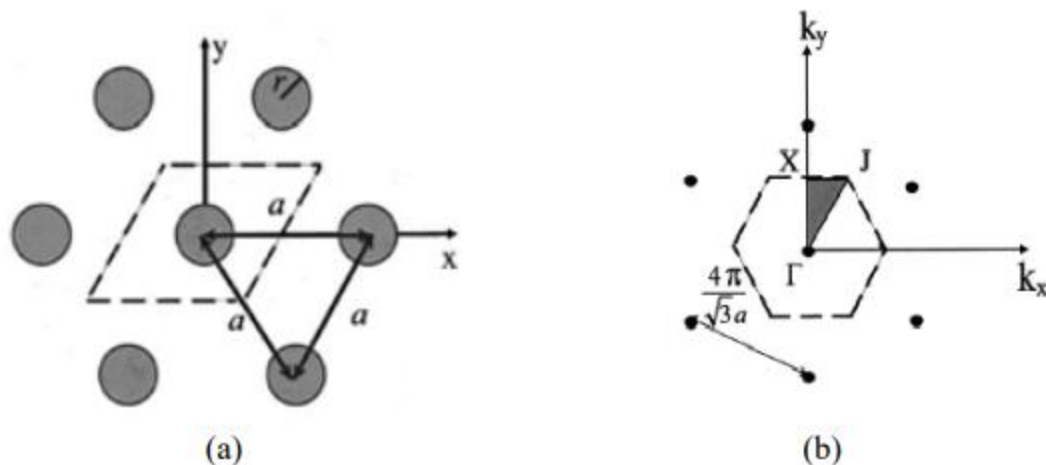


Figure 1: (a) Triangular lattice and (b) reciprocal lattice.

איור 49: סריג הופכי למשושים מלאים (נלקח מ-[11])

מפה ניקח את התוצאה הנמדדת (עם השגיאה הסיסטמטית, כי זו התמונה לה עושים FFT) מניסוי 1,  $a = (0.166 \pm 0.004)[nm]$  ונחשב קבוע סריג הופכי:

$$b = \frac{4\pi}{\sqrt{3}a} = (43 \pm 1)[nm^{-1}]$$

תוצאה אשר רחוקה מאוד מהמרחקים שנמדדו.

## 6.5 דיון בתוצאות ומסקנות

- קיבלנו תוצאה שאינה תואמת כלל לערך המצופה. ראוי לציין כי הסריג המקורי נלקח עם השגיאה הסיסטמטית (פקטור 0.67) והתוצאה גם כן אמורה להתקבל עם אותה שגיאה סיסטמטית.
- אילו היינו מחשבים את קבוע הסריג ההופכי ללא השגיאה הסיסטמטית, היינו מצפים לקבל  $b_{real} = (29.5 \pm 0.1)[nm^{-1}]$  עם אי ודאות מספרה אחרונה בערך הספרות.
- ייתכן והתמונה בהירה מדי במרכזה ולכן לא רואים את קודקודי איזור ברילואן הראשון, אבל הנקודות שכן מופיעות גם לא מתחברות לסריג בשום קונפיגורציה שניסינו. אפשר להשתכנע שאותן נקודות שקיבלנו בצורת "ריבוע" אינן מתאימות לסריג הקסגונאלי בשום צורה.
- למרות שהראנו חישוב לתמונה אחת, גם שאר התמונות שקיבלנו הניבו תוצאות דומות, בעלי אותה אי התאמה.
- ככל הנראה התמונות מטושטשות מדי בכדי לקבל תוצאה המתאימה לתיאוריה.

## 7. ניסוי 6: ניסוי בונוס - סימולציה

### 7.1 מטרת הניסוי

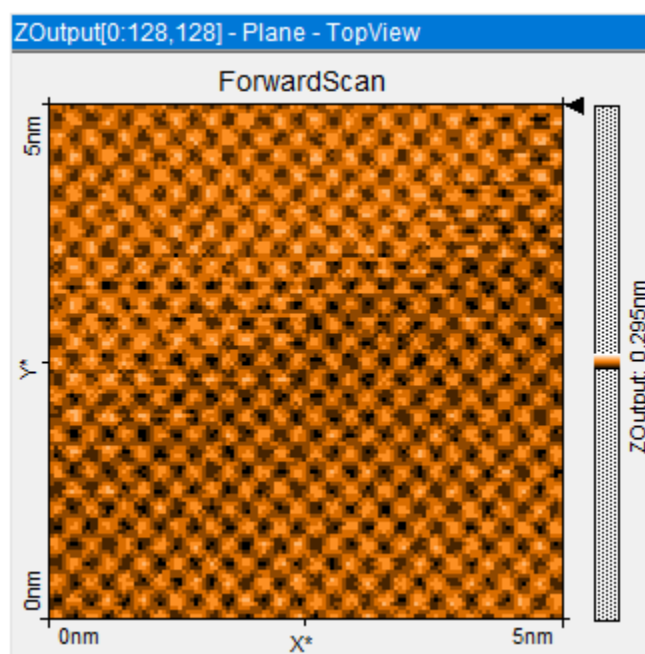
למדוד קבועי סריג של סריקת הסימולציה של תכנת ההפעלה של המכשיר.

### 7.2 תיאור המערכת ומהלך הניסוי

הדלקנו את הסימולציה של easyScan וקיבלנו את הסריקות ברזולוציות  $5[nm]$  ו- $2[nm]$ .

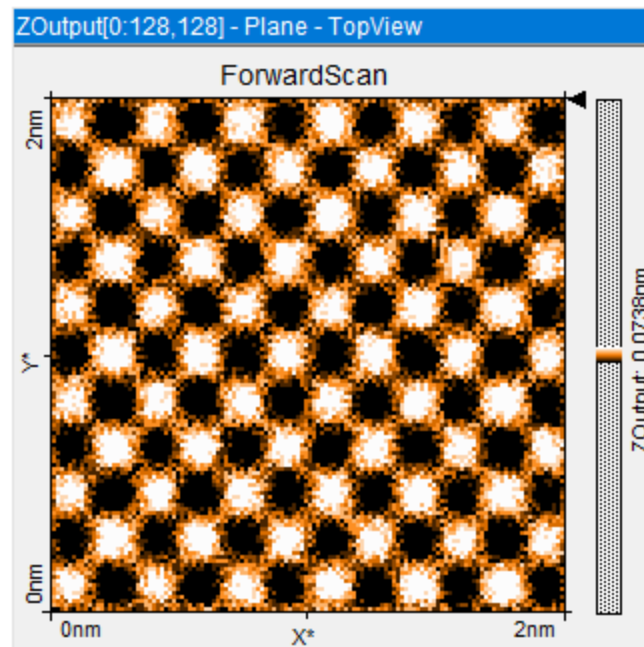
### 7.3 תוצאות הניסוי

עבור רזולוציית  $5[nm]$  קיבלנו:



איור 50: סימולציה ב- $5[nm]$

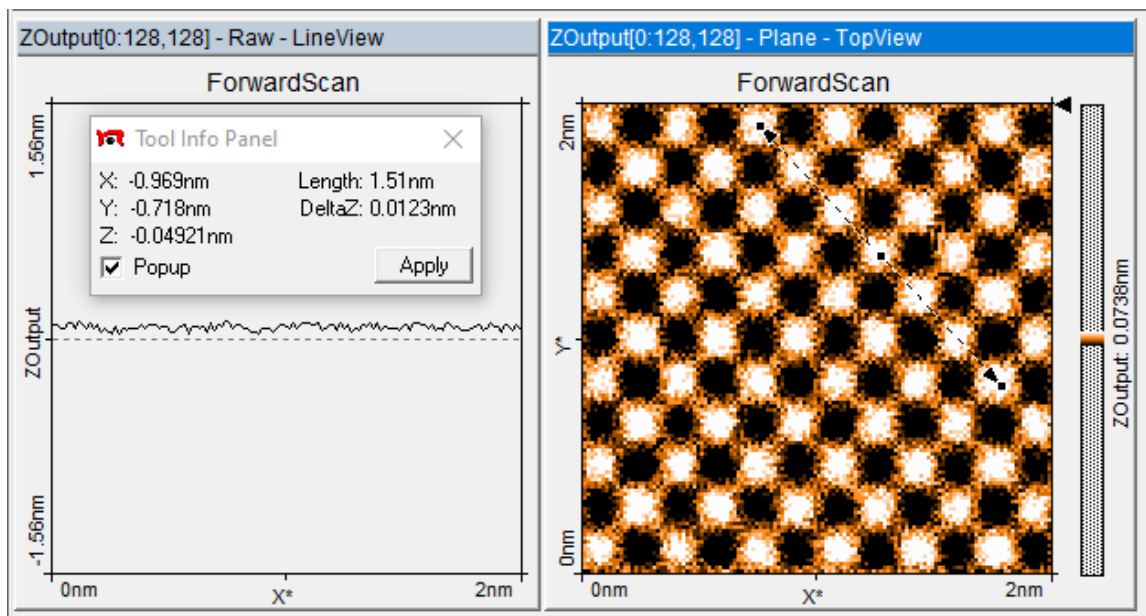
עבור רזולוציית  $2[nm]$ :



איור 51: סימולציה ב- $2\text{nm}$

#### 7.4 עיבוד תוצאות הניסוי

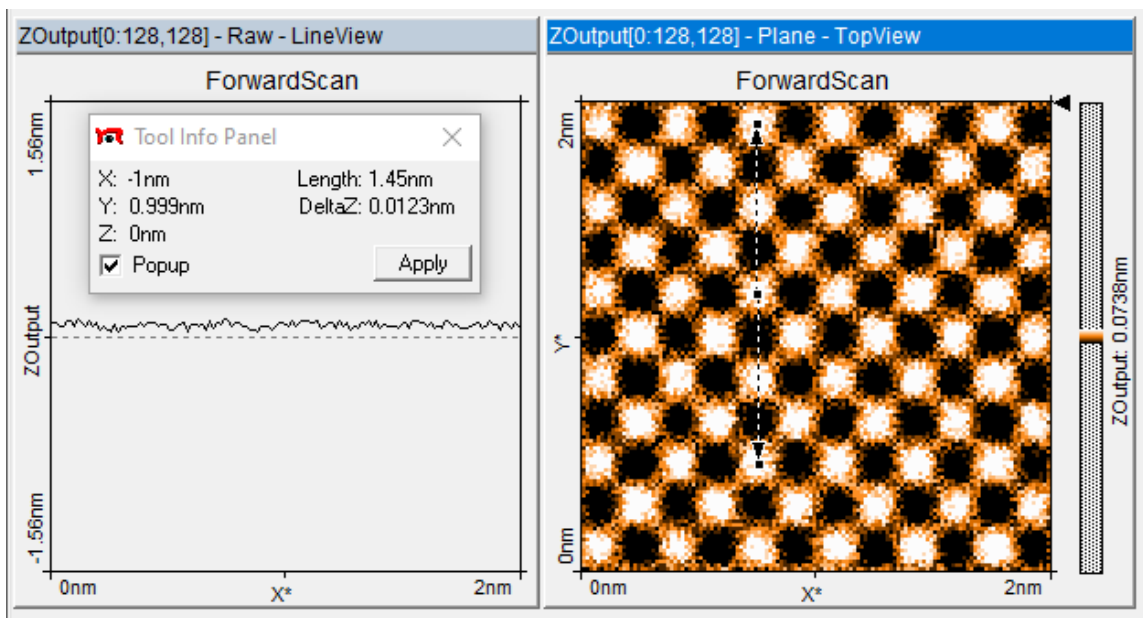
ביצענו מדידת אורכים לשתי קבועי הסריג האפשריים – מרחק לשכנים מימין/שמאל צמוד ואלכסון. בגלל שסריקת הסימולציה "אידיאלית" בצורה בה היא נבנית, לא היה טעם במדידת הזווית, כפי שהיה ניתן למדוד בדיוק  $90^\circ$  בכל מדידה.



איור 52: מדידת מרחק 1, סימולציה

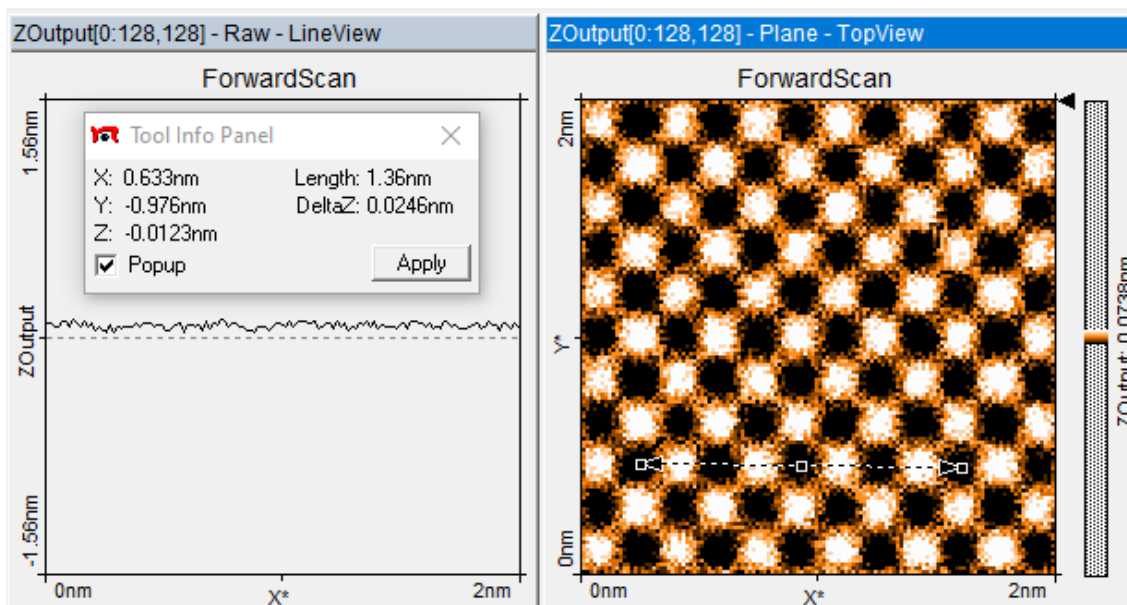


$$\frac{1.51 \pm 0.06}{6} = (0.25 \pm 0.01)[nm]$$



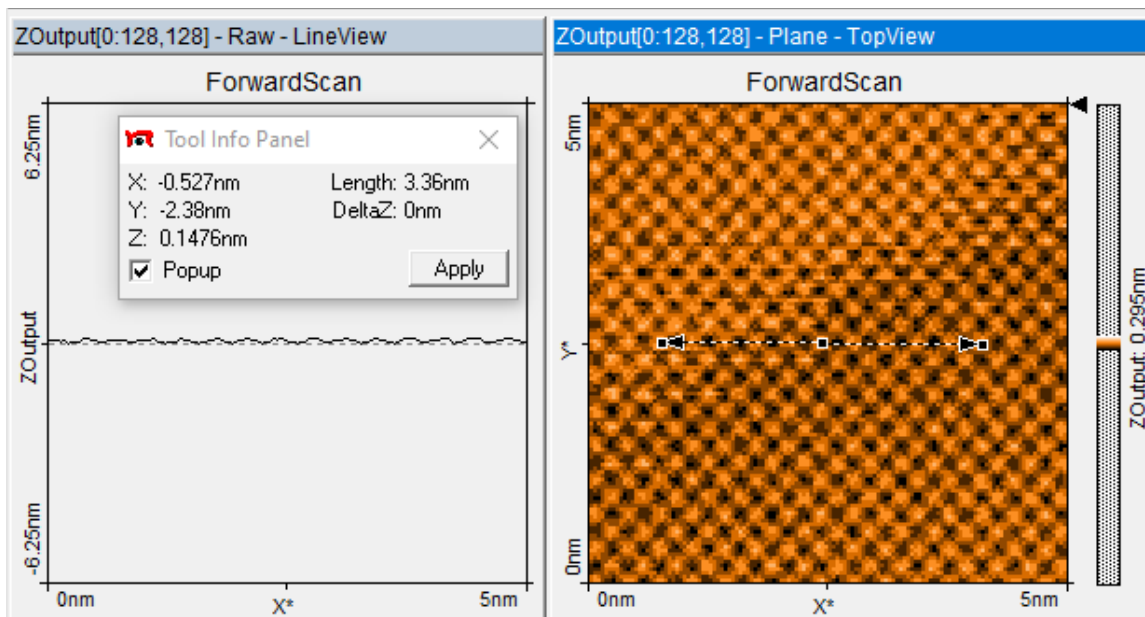
איור 53: מדידת מרחק 2, סימולציה

$$\frac{1.45 \pm 0.06}{4} = (0.36 \pm 0.01)[nm]$$



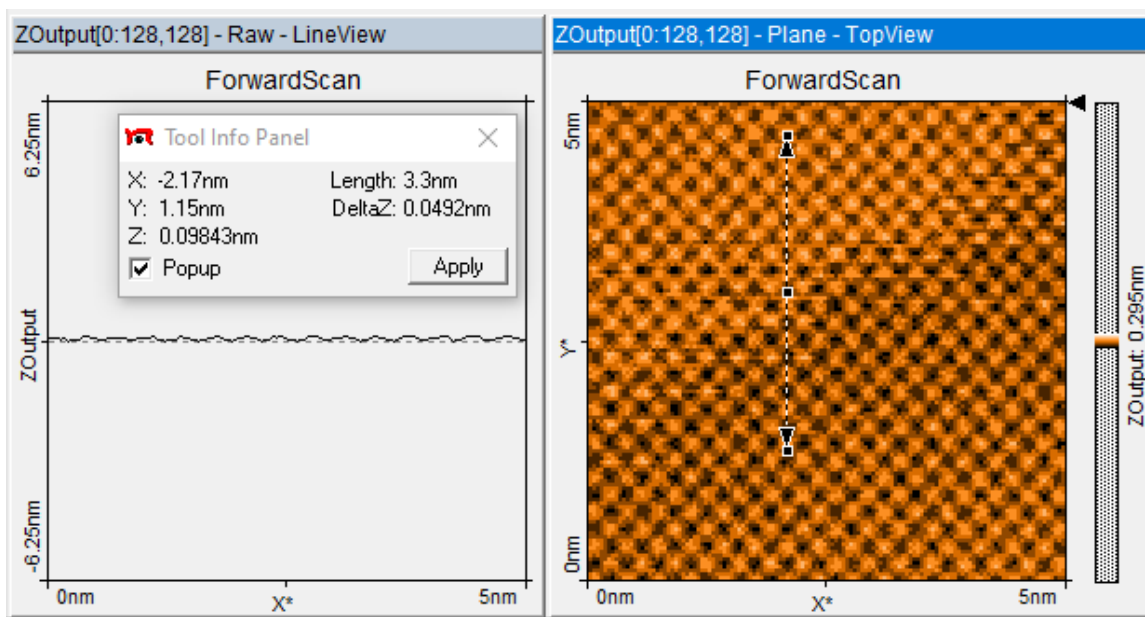
איור 54: מדידת מרחק 3, סימולציה

$$\frac{1.36 \pm 0.06}{4} = (0.34 \pm 0.01)[nm]$$



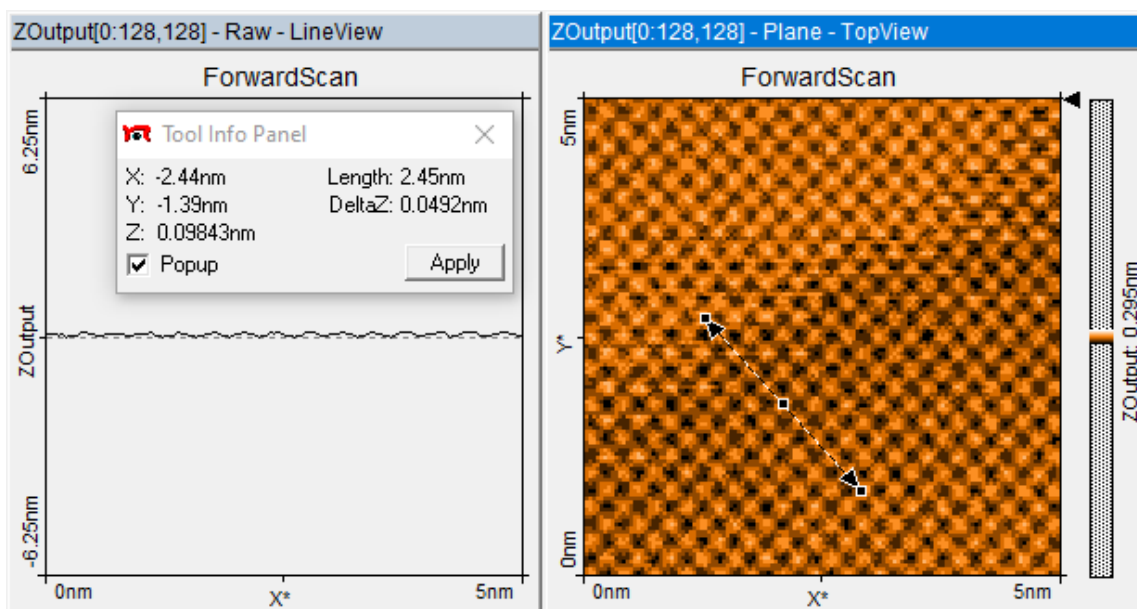
איור 54: מדידת מרחק 4, סימולציה

$$\frac{3.36 \pm 0.06}{10} = (0.336 \pm 0.006)[nm]$$



איור 55: מדידת מרחק 5, סימולציה

$$\frac{3.30 \pm 0.06}{10} = (0.330 \pm 0.006)[nm]$$



איור 56: מדידת מרחק 6, סימולציה

$$\frac{2.45 \pm 0.06}{10} = (0.245 \pm 0.006)[nm]$$

נבצע ממוצע משוקלל לקבועי הסריג שנמדדו:

קבוע סריג אלכסוני [nm]	קבוע סריג אנכי [nm]	קבוע סריג אופקי [nm]	ממוצע
$0.246 \pm 0.005$	$0.337 \pm 0.005$	$0.337 \pm 0.005$	

טבלה 2: תוצאות קבועי סריג, סימולציה

## 7.5 דיון בתוצאות ומסקנות

- קיבלנו תוצאות עם שגיאה יחסית נמוכה (1.4%-2.0% בהתאמה) והתוצאות ברזולוציות השונות תאמו זה לזה (ביחס לגודל אי הודאות). בנוסף, קיבלנו תוצאה זהה לקבוע הסריג האנכי והאופקי – תוצאה שמראה כי הסימולציה כמעט בוודאות מוחלטת מייצרת את הסריקה בצורה ריבועית.
- הסימולציה אינה מראה מבנה פיזיקלי מוכר [7] כך שאין גביש אמיתי להשוות אליו את התוצאה.

## 8. סיכום ומסקנות

סרקנו HOPG וזהב למיפוי צפיפות מצבי הפרמי שלהם.

קיבלנו עבור ה-HOPG קבוע סריג  $a = (0.139 \pm 0.003)[nm]$ ,  $b = (0.242 \pm 0.003)[nm]$  עם זווית  $\theta = (119 \pm 2)^\circ$ . זאת אחרי שגילינו שגיאה סיסטמטית במכשיר/תוכנה אשר מקטין את הסקאלה פי  $0.67 \pm 0.01$ .

עבור הזהב לא הצלחנו לקבל תמונה, כפי שצפיפות האלקטרונים בו גבוה מדי ביחס לאיכות המדידה שלנו.

ראינו על ידי ספקטרוסקופיה כי ה-HOPG מתנהג כ-semi-metal וכי הזהב כ-metal.

ניסינו למדוד קבועי סריג הופכי על ידי ביצוע FFT על הסריקות, אך לא הצלחנו לקבל תמונות אשר יתאימו לצפי התיאורטי.

מדדנו את קבועי הסריג של הסימולציה:  $a = (0.337 \pm 0.005)[nm]$ ,  $b = (0.246 \pm 0.005)[nm]$  עם זוויות  $(90, 45)^\circ$  (תלוי אם מגדירים את הסריג עם וקטורים אנכי ואופקי או לפי האלכסונים).

## 9. הצעות לשיפור הניסוי

- אמצעים להכנת טיפ איכותי יותר, עם כלי מיוחד, חומצה או כל שיטה אחרת שמופיעה בספרים [3][4][5]. שיפור חדות הטיפ תביא לתמונות יותר ברורות, לאפשרות לקיים ספקטרוסקופיית I-z וקבלת תוצאות ממנה, אפשרות לסרוק את דגימת הזהב ואף הייתה משפרת את איכות תמונת הסריג ההופכי בניסוי 5.
- לחתוך דגימות גדולות יותר. המון סריקות לא צלחו או נהרסו תוך כדי סריקה בגלל שהדגימה קטנה ו/או עם חורים בתוכה, מה שיכול להימנע עם קבלת דגימה רחבה יותר אשר דורשת פחות דיוק ידני בין המחט לדגימה.
- ביצוע ניסוי איכות סריקות כתלות בפרמטר Time/Line. כפי שראינו מגדיר את איכות הסריקה כתוצאה ממיצוע מדידה על זמן ארוך יותר לעומת הפגיעה בסריקה כתוצאה מהגדלת ההשפעה מהפלקטואציות התרמיות. ערך אשר ככל הנראה ניתן למצוא לו כיוול אופטימלי, ובכך לקבל סריקות איכותיות יותר.
- היכרות הסטודנטים עם תכנת Gwyddion. תוכנה שנעזרנו בה המון ולדעתנו הינה כלי שיכול לעזור לסטודנטים לבצע עיבוד איכותי ומהיר יותר.

## 10. רשימת מקורות

[1] תדריך ניסוי "STM", אוניברסיטת בן גוריון.

[https://moodle2.bgu.ac.il/moodle/pluginfile.php/3253075/mod\\_page/content/6/%D7%AA%D7%93%D7%A8%D7%99%D7%9A%20STM.pdf](https://moodle2.bgu.ac.il/moodle/pluginfile.php/3253075/mod_page/content/6/%D7%AA%D7%93%D7%A8%D7%99%D7%9A%20STM.pdf)

*"Measurements and their Uncertainties"*, by I. Hudghes and T.Hase [2]

"Introduction to Tunneling Microscopy", by Chen C.Julian [3]

"Scanning Tunneling Microscopy", by Joseph A.Stroscio and William J.Kaiser [4]

"Scanning Probe Microscopy", by E.Meyer [5]

LAB UNIT 5: STM [6]

[https://depts.washington.edu/nanolab/NUE\\_UNIQUE/Lab\\_Units/5\\_Lab\\_Unit\\_STM.pdf](https://depts.washington.edu/nanolab/NUE_UNIQUE/Lab_Units/5_Lab_Unit_STM.pdf)

"easyScan E-Line", Version 2.1, by nanoSurf [7]

"Gold", Webmineral [8]

[http://webmineral.com/data/Gold.shtml#.YeWZV\\_5ByUk](http://webmineral.com/data/Gold.shtml#.YeWZV_5ByUk)

"Graphite", Webmineral [9]

<http://webmineral.com/data/Graphite.shtml#.YeWZHf5ByUl>

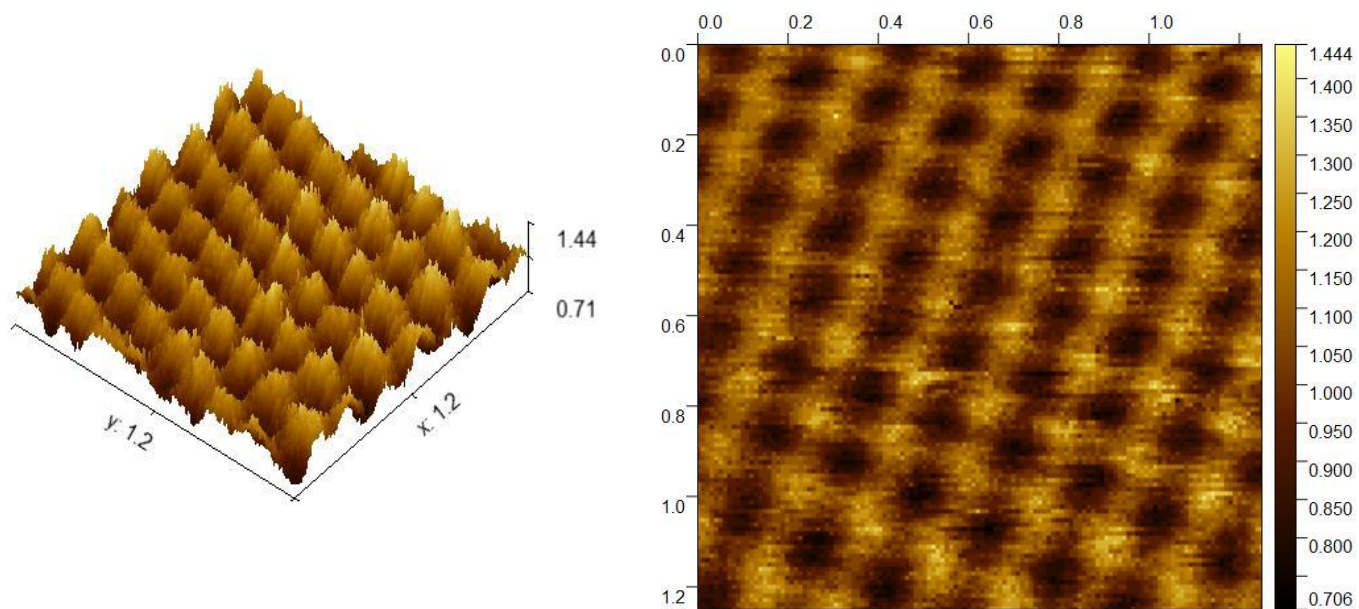
Nanoscale work function measurements by STM, 4Science [10]

[https://www.4science.net/goods/proc/attachDownload.do?mtf\\_no=61346](https://www.4science.net/goods/proc/attachDownload.do?mtf_no=61346)

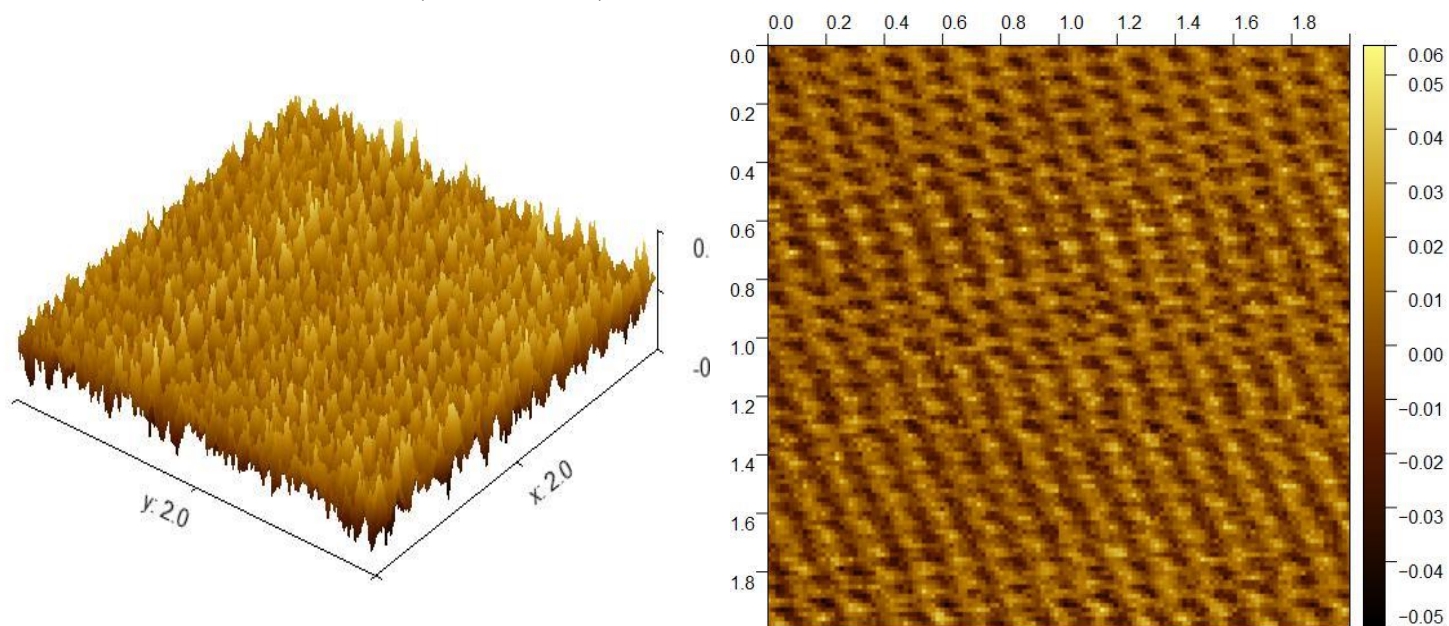
Design of Photonic Crystal Resonant Cavity Using Overmoded Dielectric Photonic Band Gap Structures, Limei Qi [11]

[https://www.researchgate.net/figure/a-Triangular-lattice-and-b-reciprocal-lattice\\_fig1\\_245554180](https://www.researchgate.net/figure/a-Triangular-lattice-and-b-reciprocal-lattice_fig1_245554180)

# 11. נספחים: מדידות ותמונות נוספות מהניסוי

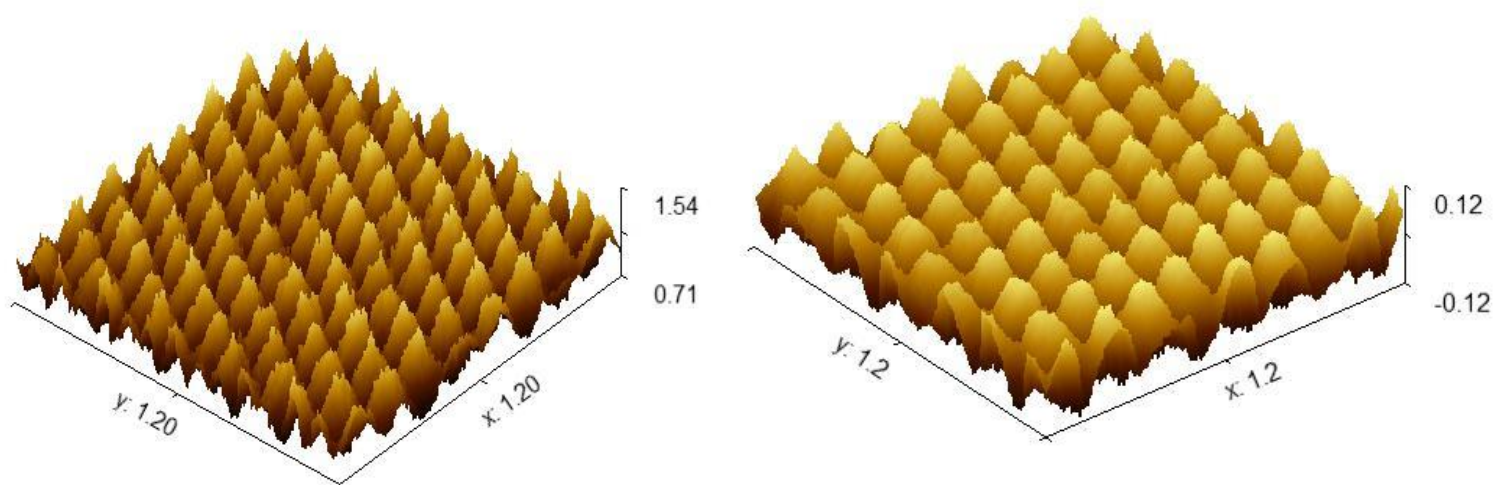


איור 11.1: מדידת סריג HOPG בשיטת גובה קבוע (בגודל של 1.2 nm).



איור 11.2: מדידת סריג HOPG בשיטת זרם קבוע (בגודל של 2 nm).





איור 11.3: ייצוג תלת מימדי של הסריקות באיורים 10 (משמאל), 11 (מימין).