

נוטכנולוגיה בראי הכימיה: אלקטרוניקה מולקולרית

אנרס ניצן, ביה"ס לכימיה, אוניברסיטת תל-אביב

מרק רטנר, המחלקה לכימיה, אוניברסיטת נורת'וסטרן, ארה"ב

בנוסף ליתרון המתבקש מעבודה בסקלת הגדלים של הטבע, האלקטרוניקה המולקולרית זוכה לעניין רב בגלל ההתקדמות הרבה באמצעי ובדרישות המחשוב. תופעה שנצפתה לראשונה ע"י מור (ומכונה כיום "חוק מור") היא שמספר הטרנזיסטורים שניתן לצופף על שטח נתון של שבב סיליקון הוכפל בשלושים השנים האחרונות כל 18 חודשים (ציור א1). "חוק מור" השני מצא שמחיר הבניה של מפעל להרכבת שבבי מחשב גדל גם

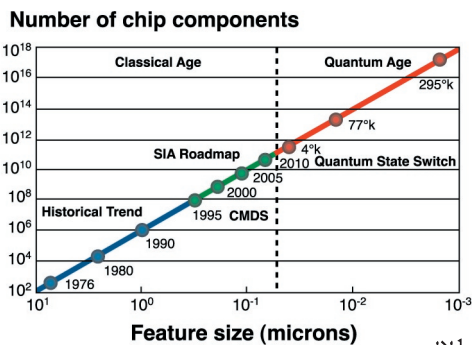
תקציר

מאמר זה מהווה סקירה של המצב הנוכחי במחקר בתחום הננו, תוך שימת דגש על תחום האלקטרוניקה המולקולרית. אנו מציינים את התכונות המולקולריות העומדות ביסודו של הפוטנציאל הטמון בשימוש במולקולות כאלמנטים חשמליים, וסוקרים את המבנים המולקולריים שמצאו ומוצאים שימוש בהתקני ננו. תופעות מעבר אלקטרוניים דרך מבנים מולקולריים כאלה נסקרות הן באספקט התיאורטי והן במסגרת התוצאות הניסיוניות שהתקבלו עד כה. בפרט אנו מדגישים את התרומות המתחרות של תהליכי מינהור, הולכת פס ואקטיבציה מלווה בזרם קפיצות. אנו מתעכבים על כמה התפתחויות חדשות בתחום זה, כולל שימושים אפשריים בתופעות מגנטיות ואופטיות במערכות מולקולריות, ולבסוף בוחנים את האפשרויות העתידיות בתחום זה.

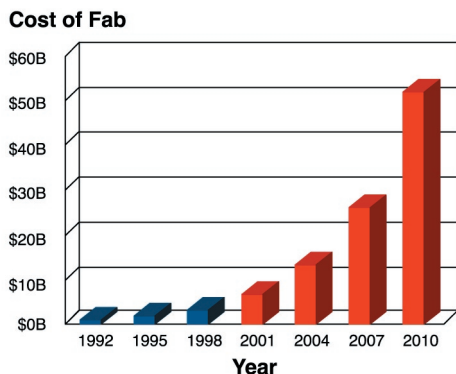
א. הקדמה

רבים העוסקים במחקר הכימיה מוצאים את עצמם לפתע במרכזה של פעילות במחקר הננו, ואין הדבר מפתיע שהרי "ננו" הוא סדר הגודל של מולקולה וכימיה היא הרי מדע המולקולות. מבחינה זו כולנו חוקרים ומלמדים "ננו". ואולם המושג "מדע ננו" כפי שהשתרש בשנים האחרונות מצומצם יותר, ועיקרו אינו מסתכם רק בגודל המערכת הנחקרת אלא בחבור בינה ובין העולם המקרוסקופי. השאיפה לשליטה בתהליכים בהם חומר, אנרגיה ואינפורמציה עוברים בין רמת הננו והרמה בה אנו מתפקדים היא לבו של תחום המחקר המוכר היום כמדע הננו. האלקטרוניקה המולקולרית היא אחד המרכיבים החשובים של מדע זה.¹ המחקר בתחום זה עוסק בהתנהגות האלקטרונית, ובהתקנים ושימושים הנגזרים ממנה, התלויים בתכונות החומר ברמה המולקולרית. יסודה של ההבטחה הגלומה בתחום זה הוא בעובדה שמולקולות הן מרכיבי המבנה של הטבע, ותכונן התקנים ברמה מולקולרית הולכת למעשה בעקבות דרך התפתחותן של מערכות חיות. יכולתם של עלים לקלוט אנרגיה, יכולת ההתכווצות של שרירים, יכולת אגירת האנרגיה של שומנים ויכולת החשיבה של המוח - הם כולם דוגמאות לפעילות הטבע ברמה המולקולרית ומקור השראה למאמציו בתחום האלקטרוניקה המולקולרית.

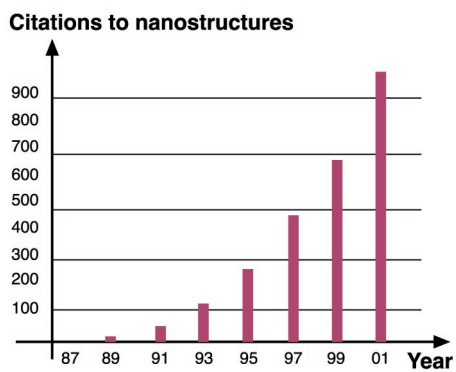
המחקר הטכנולוגי בתחום האלקטרוניקה המולקולרית מתרכז כיום בגלאים (sensors), שילוב גלאים עם קוצבים רפואיים, מסכי תצוגות (displays), חומרים "חכמים" המגיבים בצורה התלויה בגירוי שהם מקבלים, מנועים מולקולריים, התקנים לוגיים והתקני זיכרון, טרנזיסטורים מולקולריים ומערכות מולקולריות לתמסורת אנרגיה. האלקטרוניקה המולקולרית מבקשת לבנות התקנים כאלה במערכות המבוססות על מולקולה אחת או על מערכים מולקולריים (molecular arrays), כהתקנים בודדים או כחלק מרשת.



ציור א1



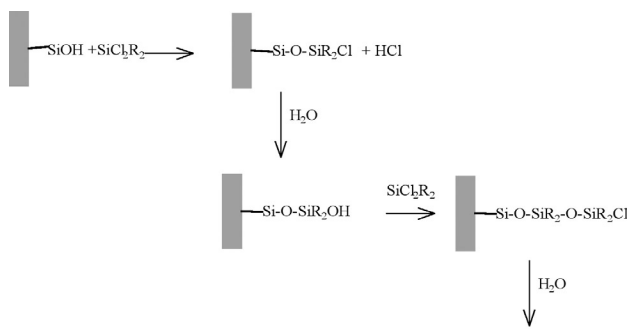
ציור ב1



ציור ג1

ציור 1: התפתחות מחקר הננו. א- השנוי בצפיפות הטרנזיסטורים על שבב סיליקון ("חוק Moore" הראשון); ב- עליית מחירם של מפעלי בניית שבבים ("חוק Moore" השני) וג- מספרי הציטוטים בתחום בשנים 1987-2001.

הומוגנית. דוגמה לכך היא היווצרות של שכבות חד-מולקולריות של אלקן-תיולים על זהב ועל מתכות אצילות אחרות. הכוח המניע את ההיבנות העצמית של שכבה מולקולרית זו על משטח המתכת הוא אינטראקציה מטיפוס חומצה/בסיס של לואיס בין הגפרית התיולית ובין משטח הזהב. השכבה הנוצרת משפיעה על תכונות הקישור של המשטחים האלה, משנה את ההידרופוביות שלהם, ויכולה ליצור שכבה מולקולרית שתגן על משטח המתכת ושתוכל לשמש גם כמרכיב במגע חשמלי.



לעיתים ההיבנות העצמית נשלטת ע"י קישור קוולנטי. דוגמה לכך היא ריאקציות דחיסה (קונדנסציה) ליצירת קשרי siloxane בתהליך

ריאקציות כאלה נחקרו במספר מעבדות, בעיקר ע"י מרקס (אוניברסיטת נורת'וסטרן)² וסגיב (מכון ויצמן)³. הפילם המולקולרי הנוצר בתהליך זה מיוצב ע"י קשרים קוולנטיים שהם חזקים יותר מהמבנים המיוצבים ע"י אינטראקציות לואיס הנוצרים במגעי זהב-תיול. עובדה זו מביאה ליצירת שכבות יציבות יותר, אם כי קלות פחות לשיפור מבנה ע"י annealing.

2. היברידיים ושכבות מורכבות

הימצאותם של מרכיבים אחדים עם אינטראקציות בין-מולקולריות שונות יכול ליצור שכבות בעלות תכונות שונות מאלו של המרכיבים הטהורים. דוגמה להיבריד כזה הוא צדף-ים העשוי מננו-חלקיקים של חומרים אורגניים ומינרליים. דוגמאות להיברידיים מולקולריים (בהם הערבוב בין המרכיבים נעשה ברמה המולקולרית) הם block copolymers וקומפלכסי תורם/מקבל (donor/acceptor) המשמשים בהתקנים אופטיים לא לינאריים. בחומרים אלה הקישור הוא קוולנטי. היברידיים מעניינים במיוחד הם המבנים המתקבלים כאשר למולקולת DNA מקושרת קבוצה תיולית המשמשת לקשירתם לננו-חלקיק מתכתי. המבנים המורכבים האלה מצאו תפקיד חשוב כחישנים ביולוגיים (ביו-סנסורים) ל-DNA⁴ היברידיים

הוא באופן אקספוננציאלי בתקופה זו (ציור 1). ברור שבכל טכנולוגיה נתונה תופעה זו אינה יכולה להמשך מבלי להיתקל במגבלות שיעצרו אותה. מעגלים אלקטרוניים שבהם מולקולות בגודל 1 nm יחליפו טרנזיסטורים קונבנציונליים גדולים בהרבה יכולים להרחיק באופן ניכר את המועד בו ההתפתחות הטכנולוגית בכוון זה תאלץ להיעצר בגלל מגבלות פנימיות של המערכת. לאור זאת, אין זה מפתיע אולי שמספר הציטוטים המדעיים למונח "nanoscience" גדל גם הוא באופן אקפוננציאלי (ציור 1).

כפי שכבר נאמר, לא פחות חשובה מגודל המולקולה היא יכולתן של מולקולות לקשור זו את זו ולהרכיב מבנים גדולים יותר המאופיינים ע"י דינמיקה סטריאוכימית תלת ממדית. האפשרות לבניה עצמית של מבנים מולקולריים תהיה חשובה במאמציו לפתח התקנים מולקולריים בעלי תכונות טכנולוגיות רצויות.

2. בניה (Fabrication)

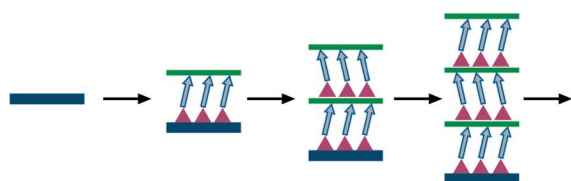
1. מולקולות ומבנים מולקולריים

הכימיה היא המדע העוסק בהכנת מבנים מולקולריים. כימיה סינתטית היא אחד העיסוקים העיקריים של הכימיה, ובמהלך הדורות הצליחה אכן ליצור כל דבר החל מצבע הארגמן ועד לגומי סינתטי, מניילון ועד ויאגרה. הבעיות הקשות בהכנת מבנים המתבססים על תכונותיהן של מולקולות יחידות אינן בהכנת המולקולה אלא בשליטה במבנה כולו שבו המולקולה מקשרת בין חלקים אחרים של המערכת. אף על פי שכימיה סינתטית מסורתית בונה קשרים קוולנטיים, קשרים חלשים שאינם קוולנטיים עומדים במרכזם של מבנים רבים שאנו מוצאים במערכות מולקולריות טבעיות. למשל קשרי מימן ממלאים תפקיד עיקרי בקיום המבנה של כמה חלבונים, משיכה בין אורביטלות π של מישורים מולקולריים סמוכים (π-stacking interactions) חשובה בשמירת היציבות של DNA, אינטראקציות הידרופוביות מייצבות מבני ממברנות וכוחות דיספרסיה הם הגורמים העיקרים במעבר הפאזה של CO₂ לקרח יבש.

האלקטרוניקה המולקולרית משתמשת הן באינטראקציות קוולנטיות והן בכוחות חלשים יותר כדי ליצור מבנים מולקולריים ארוכי טווח. המונח "היבנות עצמית" (self assembly)⁵ מתאר תהליך בו מבנה מולקולרי נוצר באופן ספונטני בצורה המשקפת את הכוחות הבין מולקולריים ואת האינטראקציה עם הסביבה. היווצרות של גביש מנוזל מקורר ביתר היא דוגמה פשוטה לתהליך כזה, ואולם התהליכים המעניינים בהקשרים של אלקטרוניקה מולקולרית הם כאלה בהם המבנה הרצוי נוצר במשטח בין פאזי של מערכת לא

⁵מעניין לציין שהמונח "self assembled monolayer" נטבע לראשונה ע"י כתב של עיתון מדע פופולרי New Scientist, 98, 20 (1983) כאשר סקר תוצאות של סגיב וקבוצתו (1983) 105 674 J. Am. Chem. Soc. L. Netzer and J. Sagiv.

סימטרי אינם יכולים לפעול כמכפילי תדירות. תכנון ההיבנות המכוונת כדי ליצר חומרים חסרי מרכז סימטריה יכול להשתמש בריאקציות כימיות מתאימות או להיעזר בשדה חשמלי או מגנטי חיצוני (ציור 3). זה המקום להעיר כי יכולתנו להניע בניה מכוונת במעבדה נמוכה לאין שיעור מזו של הטבע. בספר המדע הבדיוני החדש של Michael Crichton "טרף" (Prey) מותקפים בני האדם ע"י רסיסי חומר שחור אשר יכולים לבנות את עצמם, כעין ננו-חלקיקים היכולים להוליד חלקיקים חדשים. במציאות אין בנמצא או בתכנון שום תהליך שיוכל ליצור ננו-חלקיקים כאלה.



ציור 3. תיאור סכמטי של בניית שכבה מולקולרית עם אסימטריה פנימית על משטח.

1. טרנספורט

1. מגעי מינהור מולקולריים

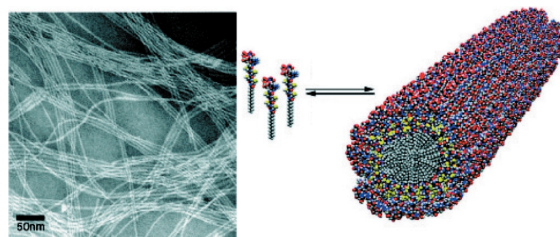
השאלה הפשוטה ביותר בתחום האלקטרוניקה המולקולרית היא בנושא ההולכה: האם מולקולה המקשרת בין שתי אלקטרודות יכולה להעביר זרם? המצאת מיקרוסקופ המנהור האלקטרוני (1983) ע"י Rohrer ו Binnig ממעבדות IBM בציריך היא ללא ספק האירוע היחיד החשוב ביותר עד כה בהתפתחות המדעית והטכנולוגית בתחום הננו. פעולתו של מיקרוסקופ זה מבוססת על מעבר זרם מנהור אלקטרוני בין קצהו של חוד מתכתי אטומי ובין משטח מוליך, והוא מסוגל להבחין באטומים או מולקולות על פני המשטח באמצעות העובדה שהזרם העובר תלוי במולקולה הספוחה שבין החוד למשטח. בנוסף, החוד האטומי יכול לשמש לדחיפה פיזית של אטומים או מולקולות על פני המשטח. כך, מיקרוסקופ המינהור האלקטרוני מאפשר לנו להבחין במבנה הטבעי בסקלת האורך של אטום או מולקולה יחידים (כפי שמעידים אלפי תמונות הממלאות את דפי הספרות העולמית המתעדת תחום זה מאז המצאתו) - וגם ליצירת מבנים מולקולריים ע"י הזזת אטומים יחידים או מולקולות יחידות. דוגמה מרשימה ליכולת זו הוצגה לאחרונה⁷. בנוסף, מנגנון הפעולה של מכשיר זה מהווה הוכחה לכך שמולקולה ספוחה יכולה לשמש כתווך להעברת אלקטרונים, כלומר כמוליך חשמלי.

טכנולוגית ההכנה של מגעי מוליכות מולקולריים כבר עברה את השלב הראשוני הזה של "הוכחת הקיום". המגעים המולקולריים הנחקרים כיום במספר מעבדות בעולם כבר נראים כמו גשרי מוליכות רגילים בהם מולקולה אחת או יותר מקשרות בין קתודה ואנודה מתכתיות (ציור 4), ברוב

מעניינים אחרים שזכו לפרסום לאחרונה מתקבלים ע"י קישור בין צינוריות פחמן (carbon nanotubes) ופולימרים מתאימים.⁵ צינוריות פחמן, אחד המבנים המולקולריים החשובים ביותר שהתגלו במאה שעברה, היא מולקולה קשיחה וארוכה העשויה מאטומי פחמן, הניתנת לתיאור כמבנה המתקבל כאשר משטח גרפיט מתגולל על עצמו כך שיתקבל גליל פחמן ארוך. צינוריות אלה הן מולקולות יציבות ביותר, בעלות חוזק מכני רב, מוליכות טובות של חשמל וחום אך אינן ניתנות בקלות לשינוי ושליטה כימיים. עבודה רבה מושקעת בניסיונות ליצור מולקולות מורכבות בהן שרשרת פולימרית עוטפת את צינורית הפחמן. המבנים המתקבלים מאחדים את החוזק המכני ותכונות ההולכה הטובות של צינורית הפחמן עם תכונות הקישור הכימי של מולקולת הפולימר העוטפת אותה.

4. בניה מכוונת

המונח "בניה מכוונת" (directed assembly) מציין תהליך של בניה עצמית המכוון להשגת מבנה מסוים רצוי. לפעמים הכוון מוכתב ע"י הטבע, למשל בתהליך קיפול חלבון, בתהליך קישור DNA, ובכל תהליכי ההכרה בביוכימיה ובביוכימיה (bio-recognition processes). פעמים אחרות החוקר הוא היוצר את התנאים להתכוונות התהליך. כדוגמה, ציור 2 מראה מודלים ליצירת מבני עצמות מלאכותיים ממחקר הנעשה במעבדתו של Stupp⁶ באוניברסיטת Northwestern. הסיב הצינורי הנראה בתמונה מורכב מפולימרים מולקולריים הנקשרים זה לזה. הכנתן של מולקולות אלה נעשית כך שהדופן החיצוני של הצינוריות המתקבלות בנויה מסוג מסוים של טרי-פפטידים הפועלים כמרכזי קישור ליצירת עצם ע"י המערכת האוסטאובלסטית (מערכת יצירת העצם) של הגוף. בתמונה נראית גם התחלת היווצרות של עצם מסביב למבנה המולקולרי הצינורי שהוכן במעבדה.



ציור 2. מודל ליצירת מבני עצמות מלאכותיים (ראה גוף המאמר).

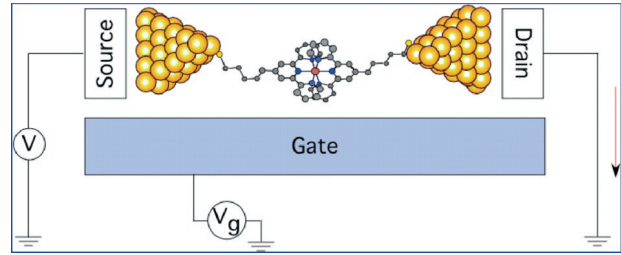
בשימושים שונים של אלקטרוניקה מולקולרית, למשל בשימושים אופטו-אלקטרוניים, חיוני לבנות לפעמים מבנים בעלי אסימטריה מתאימה. כדוגמה חומרים בעלי מבנה

הוא יכול לשהות בין הקפיצות. זהו מנגנון ההולכה הרגיל בתווכים מאקרוסקופיים, והוא מתרחש בהרבה חצאי מוליכים ובפולימרים מוליכים אלקטרונית כאשר אורכם גדול מהמרחק שבין הפרעות לתנועה. באמצעותו המטען יכול לעבור דרך ארוכה לאורך הגשר המולקולרי.

המנגנון השלישי למעבר אלקטרון דרך מולקולה הוא מנגנון המנהור. במנגנון זה האלקטרון אינו מאכלס למעשה את הגשר המולקולרי אלא עובר דרך המולקולה בלי לשהות בה. מנגנון העברה כזה, המכונה לעיתים "חילוף-על" (super-exchange), יכול להיות חשוב במקרים בהם אנרגיית האלקטרון אינה מספיקה כדי לאכלס את הגשר המולקולרי בעוד שמרחק המעבר עצמו (אורך המוליך המולקולרי) אינו גדול.

שלושת המנגנונים האלה למעבר אלקטרוני דרך מולקולות נבדלים זה מזה בתלותם באורך המולקולה. במעבר בליסטי המוליכות אינה תלויה באורך המוליך ואילו בתהליך הקפיצות היא יורדת בפרופורציה הפוכה לאורך זה. לעומת זאת היא יורדת באופן חריף, בתלות אקספוננציאלית, עם עליית אורך המוליך במנגנון חילוף-העל, ונעשית זניחה במנגנון זה באורכים גדולים מ-2-3 ננומטר. זוהי ההתנהגות הטיפוסית של הרבה מוליכים אורגניים במתחים נמוכים.

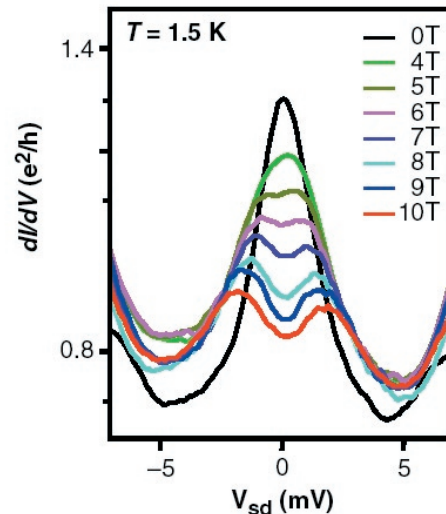
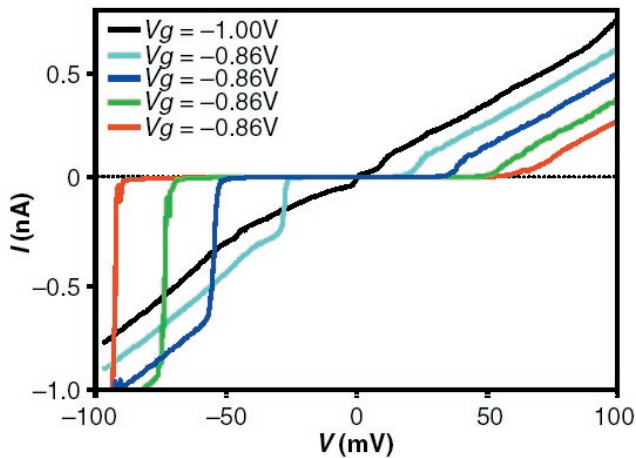
ההיסטוריה של מוליכים מולקולריים היא קצרה יחסית: Kuhn וקבוצתו מדדו מעבר אלקטרון דרך שכבות מולקולריות כאלה כבר בשנות השבעים⁸, ואולם המדידה הראשונה (בעזרת מיקרוסקופ מינהור) של מוליכות של מולקולה יחידה נעשתה רק ב-1995 ע"י קבוצה מאוניברסיטת Purdue⁹, שקבלה עבור מולקולת אלקיל-תיול התנגדות בסדר גודל של 12 מיליון-אום. בישראל נעשות כיום עבודות כאלה בקבוצתיהם של דוד כאהן במכון ויצמן ושל שחר ריכטר באוניברסיטת ת"א. DNA מהווה



ציור 4. סקיצה של ההתקן בו התקבלו התוצאות הנראות בציור 5¹⁰

המקרים עדין ללא אלקטרודת השער. יש לציין שברובם המכריע, החומרים המכונים "מולקולריים" הם מבודדים: אנו משתמשים בגומי או בחומר פלסטי לצפוי חוטי מתכת מוליכים כדי לבודד. ולמרות זאת, בתנאים המתאימים אלקטרוניים יכולים לעבור דרך מולקולות כפי שיוסבר להלן.

התיאוריה מלמדת שאלקטרוניים יכולים לעבור דרך מולקולות באחת משלוש דרכים. בראשונה התנועה היא בליסטית כלומר דומה לתנועתו של חלקיק חופשי במרחב, ללא הפרעות. ההולכה בצינוריות פחמן או ב"מקלות-ננו" (nanorods) שרשרות קצרות של אטומי מתכת (ולאחרונה גם חצאי מוליכים כמו ניטריד הגליום או סיליקון) היא לעיתים כזו. תנועה בליסטית כזו מאפיינת מעבר דרך מוליכים שאורכם קצר מהמרחק האופייני שבין הפרעות הנגרמות ע"י פגמים במבנה, ההתנגשויות עם אי-ניקיונות ואינטראקציה עם התנועה הגרעינית. בשנייה, המוליכות הנצפית בניסיון היא תהליך בו האלקטרון עובר מן הקתודה לאנודה ע"י שרשרת קפיצות עוקבות דרך אתרים סמוכים בגשר המולקולרי בהם



ציור 5. תופעות המחסום הקולומבי (שמאל) ואפקט Kondo (ימין) במגע מולקולרי שבו מולקולה מסוג RSH-Co(tpy)-RSH מגשרת בין שתי אלקטרודות זהב¹⁰.

אלא אם כן המתח הוא כזה המאפשר התגברות על מחסום הפוטנציאל החשמלי להזרקה מטען אל תוך המולקולה. התמונה הימנית מראה אפקט מעניין אחר: מכסימום ההתנגדות המתקבל במתח אפס בטמפרטורות נמוכות נובע מתופעה הנקראת אפקט Kondo, שהוא תוצאה של האינטראקציה בין אורביטלה מלאה למחצה על אטום המתכת (קובלט) שבמרכזו של הגשר המולקולרי, ובין אלקטרוני ההולכה של המתכת. התקן דומה שימש לאחרונה ניסוי מעניין אחר שבו יורם זלצר, פוסט-דוקטורנט ישראלי העובד באוניברסיטת Penn State, מדד כפונקציה של הטמפרטורה, את המעבר בין מוליכות-מנהור בטמפרטורות נמוכות ובין מוליכות-קפיצות בטמפרטורה גבוהה יותר ואת ההשפעה של אירועים לא אלסטיים בהם האלקטרון מאבד אנרגיה העוברת לויברציות של הגשר המולקולרי.¹¹

כל המדידות שהוזכרו ומספר רב של מדידות חשובות אחרות שנעשו בעשור האחרון עדיין נמצאות בשלב התחלת. התחום סובל מבעיה קשה יחסית של חוסר הדירות: מדידות על אותה מערכת במעבדות שונות אינן מצליחות תמיד לתת תוצאות דומות, ואפילו מדידות חוזרות באותה מעבדה נותנות לפעמים תוצאות שמשמעותן מתבררת רק לאחר התבוננות במדגם סטטיסטי.¹² פעמים רבות הסיבה לכך היא שמגעי תיול-זהב המשמשים ברוב הנסיונות אינם יציבים ביותר ונתונים בטמפרטורת החדר לשינויים אקראיים. ציור 6 מראה תוצאה של מדידת מוליכות דרך שכבה חד-מולקולרית מעורבת, שהוכנה בבניה עצמית על זהב.¹³ תמונות עוקבות מראות זרם מופיע ונעלם, התנהגות שהסיבה הסבירה לה היא שינוי בזמן של מבנה דינמי באזור המגע. דוגמה נוספת לתופעה זו ניתן למצוא בעבודה 14 שפורסמה לאחרונה. מעניין לציין שתלות הזרם במתח ניתנת פעמים רבות לאפיון בצורה טובה יותר מאשר הערך המוחלט של הזרם הנמדד. הסיבה לכך תובהר להלן.

(2) התיאוריה של מעבר אלקטרוני דרך מולקולות

שני גורמים מרכזיים משפיעים על המוליכות של מולקולה המחברת בין שתי אלקטרודות. האחד הוא טיב הקשר בין המולקולה והמתכת בשני הקצוות. השני הוא יעילות המעבר דרך הגשר המולקולרי. Landauer, שפיתח את המחקר התיאורטי בתחום ההולכה ע"י מגעי-ננו (אבל לא עסק ספציפית במולקולות) הציע את הנוסחה הבאה לקשר שבין מוליכות המגע ובין סיכוי המעבר האלקטרוני:¹⁵

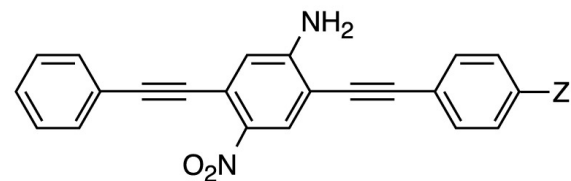
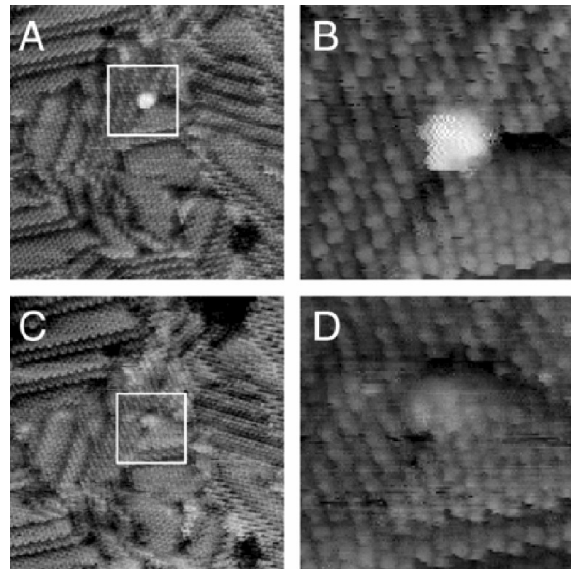
$$g = \frac{2e^2}{h} T; \quad T = \sum T_i \quad (1)$$

בביטוי זה g הוא המוליכות, e -מטען האלקטרון, h -קבוע פלנק ו- T_i הוא סיכוי המעבר עבור אלקטרון באופן-ההולכה i . (אופני ההולכה i מאפיינים את המצבים של תנועת האלקטרון

מטרה מרכזית במדידות כאלה, בין השאר בקבוצתו של דני פורת באוניברסיטה העברית (בווריאציה אחרת, שפותחה ע"י יואב אייך, ארז בראון ואורי סיון מהטכניון, משמש ה-DNA כתבנית (template) לציירת מוליכי-ננו מזהב). קשרים תיוליים עם אלקטרודות המתכת משחקים תפקיד מרכזי כמעט בכל מדידות המוליכות המולקולריות שפורסמו עד היום.

בנוסף להתקנים דמויי מיקרוסקופ המינהור, נעשית עבודה חשובה ב"מגעי שבירה" בהם מולקולות מחברות בין שתי קצוות שהתקבלו משבירת חוט מתכת דק. עבודה אלגנטית במיוחד נעשתה לאחרונה במבנים בהם השבירה נעשית בצורה אלקטרוכימית: זרם חזק יחסית מועבר דרך תיל זהב דק (~20nm) וגורם לאלקטרו-מיגרציה וליצירת מרווח ברוחב של 1nm בו שכבה מולקולרית יכולה להיווצר בבניה עצמית. אם מבנה כזה מושם על משטח סיליקון היכול לשמש בעצמו כמקור מתח נמצא בידנו התקן בין שלוש אלקטרודות: קצוות חוט הזהב מתפקדים כאלקטרודות מקור (source) ויציאה (drain) בעוד שמשטח הסיליקון מהווה אלקטרודת-שער (gate).

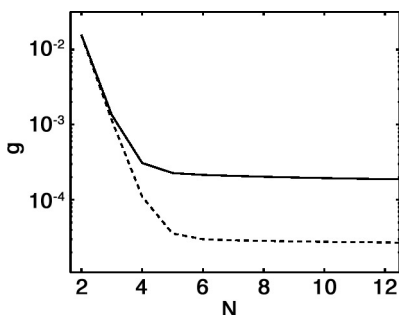
ציור 5 מראה תוצאות שהתקבלו לאחרונה ע"י קבוצת חוקרים מאוניברסיטת קורנל שעבדו בשיטה זו.¹⁰ הגרף משמאל מראה תופעה המכונה Coulomb blockade - זרם אינו יכול לעבור



ציור 6. תנודות במוליכות של מגע בהן מולקולות מהסוג הנראה מלמטה (Z מציין קבוצה תיולית) ספוחות (דרך קשר תיולי) על משטח זהב. האלקטרודה השנייה היא חוד של STM.¹³

$$T(E, V) = \text{Tr}\{\Gamma_L G^\dagger \Gamma_R G\} \quad (3)$$

(האופרטור Tr מציין סכום על כל מצבי הגשר המולקולרי). ציור 7 מראה סקיצה של הגדלים המופיעים במשוואות (2) ו-(3). את הפונקציות G ו- Γ ניתן לקבל מחשובים בשיטות של כימיה קוונטית ותורת הפיזור. הפונקציה G מכילה אינפורמציה על צורת האורביטלות המולקולריות ועל האנרגיות שלהן. התוצאה מראה שהמוליכות גבוהה יותר ככל שהאורביטלות המולקולריות ממוקמות פחות, והיא גבוהה במיוחד במולקולות בהן האורביטלות האלו מתפשטות על פני כל המולקולה, בין



ציור 8. המוליכות g כפונקציה של אורך המוליך המולקולרי (מבוטא ע"י מספר האתרים N) במודל¹⁷ שבו ההולכה ע"י מינהור מתחרה בהולכת קפיצות. שני הקווים בציור מתייחסים לחוקי צימוד שונים אל הסביבה התרמית.

שני הקצוות הקשורים לאלקטרודות. כמו כן עולה המוליכות ככל שאנרגיית האורביטלות דרכן עובר האלקטרון קרובה יותר לאנרגיית ההזרקה של אלקטרון למולקולה - אנרגיית פרמי של האלקטרודה המוסטת ע"י הפוטנציאל הנתון.

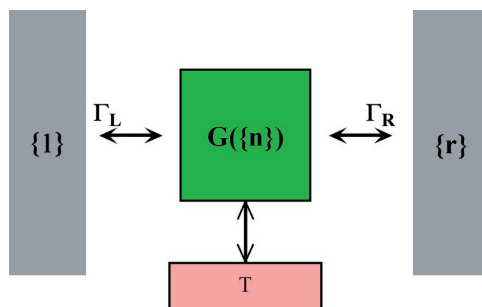
הביטויים (1)-(3) תופסים בהזנחת השפעת צימוד אפשרי בין האלקטרונים לסביבה התרמית של המולקולה. הזנחה זו מהווה קרוב טוב בטמפרטורה נמוכה ובגשרים מולקולריים קצרים יחסית. תיאוריה כללית יותר מראה¹⁷ בהסכמה עם הניסיון, מעבר בין הולכה ע"י מנהור לזרם-קפיצות הן כאשר הטמפרטורה עולה¹⁸ והן בטמפרטורה קבועה כאשר אורך המוליך המולקולרי גדל¹⁴. ציור 8 מראה את האפקט השני: אנו רואים מעבר ממנגנון המנהור (בו המוליכות יורדת אקספוננציאלית עם עליית האורך) למנגנון הקפיצות (בו התלות באורך חלשה ואינה נראית בטווח האורכים שבציור) כאשר אורך המוליך המולקולרי גדל.

ההסתכלות במולקולה כמוליך חשמלי היא נקודת מבט חדשה ואולי מפתיעה על העולם המולקולרי, ואולם תהליכי מעבר אלקטרון בין מולקולות ודרכן עומדים במרכז של תופעות כימיות בסיסיות כגון ריאקציות חמצון חוזר. הביטוי (4) מציג את סיכויי המעבר של אלקטרון דרך מולקולה המגשרת בין שתי אלקטרודות כנקבע ע"י תכונה מולקולרית המתבטאת בפונקציה G וע"י חוזק האינטרקציות בין המולקולה

בכיוונים המאונכים לכיוון הזרם). המספר $2e^2/h = 1/(12000\Omega)$ (מסמן את יחידת ההתנגדות אוהם) מכונה לעתים "הקוונט של המוליכות" - זוהי התרומה למוליכות של אופן-הולכה של i (channel) שבו סיכויי המעבר הוא 1. אם מוליך מולקולרי במגע בין שתי אלקטרודות היה מספק מצב כזה, היינו מודדים בערך מיליאמפר של זרם במפל פוטנציאל של 10 וולט. תרחיש כזה אינו בלתי אפשרי: התיאוריה מראה שבמקרה של רוזנס בין מצב מולקולרי הממוקם בין שתי אלקטרודות ובין רמות פרמי של האלקטרודות האלה סיכויי המעבר יכול להתקרב ל-1. במציאות הזרמים הנמדדים במגעים מולקולריים הם בדרך כלל מסדר גודל של 10^{-6} - 10^{-9} אמפר במפל פוטנציאל מסדר גודל של וולט אחד. יש להדגיש שהנוסחה מתקבלת עבור המקרה בו הפרש הפוטנציאל החשמלי בין האלקטרודות המקושרות ע"י המולקולה הוא קטן ביותר, והערכות המצויות במשפטים האחרונים מבוססות על ההנחה שהמוליכות אינה תלויה במתח גם במתחים גבוהים יחסית. ההכללה של הביטוי (2) למקרה של מפל פוטנציאל V כלשהו ניתנת ע"י¹⁶

$$I(V) = \frac{2e}{h} \int_{-\infty}^{\infty} dE (f(E) - f(E + eV)) T(E, V) \quad (2)$$

כאשר $I(V)$ הוא הזרם הנמדד במתח V ו- $f(E)$ היא פונקציה פרמי של האלקטרודות. במקרה הכללי הזרם אינו פונקציה ליניארית של המתח V גם בגלל שהפונקציה f אינה ליניארית וגם בגלל שסיכויי המעבר T יכול להיות תלוי במתח זה. הביטוי המיקרוסקופי לסיכוי זה ניתן באמצעות פונקציות גרין של הגשר המולקולרי ובאמצעות חוזק הצימוד בין המולקולה והאלקטרודות השמאלית (L) והימנית (R) המובע ע"י הפונקציות הספקטרליות המתאימות ו-



ציור 7. סקיצה של מגע מוליכות מולקולרי. המלבן הירוק (המרכזי) מייצג את הגשר המולקולרי - מערכת המתוארת בבסיס של n מצבים מולקולריים ע"י מטריצת גרין מתאימה. המלבנים האפורים מייצגים את רצפי המצבים האלקטרוניים $\{l\}$ ו- $\{r\}$ של האלקטרודות, השמאלית והימנית כאשר Γ_L ו- Γ_R מבטאים את מהירות המעבר של האלקטרון מאתרים שונים במולקולה אל האלקטרודות המתאימות. המלבן הוורוד (התחתון) מייצג את הסביבה התרמית בטמפרטורה T .

והאלקטרודות המתבטאת בפונקציות Γ . אם סדר הגודל של Γ ידוע (ואכן ניתן למדודו בשיטות ספקטרליות ואחרות), ניתן למצוא קשר בין שני גדלים מדידים שונים: מקדם המהירות k של תהליך מעבר האלקטרון דרך מולקולה נתונה וההולכה g של מגע מולקולרי בה אותה מולקולה מגשרת בין שתי אלקטרודות. שימוש בהערכות ידועות של Γ מובילות לקשר המספרי¹⁹

$$g(\Omega^{-1}) \approx 10^{-17} k (s^{-1}) \quad (4)$$

שאינן לקחת כקשר כמותי אלא כהערכת סדר גודל בלבד.

ד. התפתחויות חדשות

היכולת להכין מגעים מולקולריים ולאפיין את מבנם מתפתחת במהירות, ואתה גם מגוון ואיכות התוצאות המתקבלות. "התפתחויות חדשות" בתחום זה פירושו לכן לרוב תוצאות מן השנה האחרונה. מספר קבוצות הכינו לאחרונה מגעים מולקולריים המתבססים על קשר קוולנטי בין מולקולות או שכבות מולקולריות ובין משטחים של מוליכים למחצה²⁰. קשרים אלה חזקים בצורה משמעותית מקשרי בסיס/חומצה של לואיס הנוצרים בין קבוצות תיוליות לזהב, והמבנה של המגעים הנוצרים בצורה זו יציב. יש לצפות שהפלוקטואציות המאפיינות מגעי תיול-זהב (ציור 6) לא יופיעו במערכות כאלה. במגעים כאלה תלות המוליכות במתח משקפת את המבנה האלקטרוני ובעיקר את צפיפות המצבים של המוליך למחצה. ההתנהגות הבלתי אהומית[†] הנובעת מכך משקפת את ייחודן של אלקטרודות מסוג זה, ויכולה להיות בעלת חשיבות רבה בקביעת תכונות התגובה של ההתקן בו הן ישמשו. מדידות המראות מעבר ממוליכות-מנהור למוליכות-קפיצות עם עליית הטמפרטורה נעשו לאחרונה במוליכים מולקולריים המבוססים על קשרים קוולנטיים של המוליך המולקולרי עם אלקטרודות פחמן¹⁸.

התוצאות שהוצגו בציור 5, המבטאות את השפעת אפקט Kondo על מוליכות המגע המולקולרי גם הן מהוות התפתחות משמעותית ביותר לגבי הבנת מנגנון ההולכה דרך המולקולה. אפקט Kondo מופיע כמקסימום בגרף המוליכות כנגד המתח בנקודה בה המתח מתאפס, בטמפרטורה נמוכה, עבור מוליך מולקולרי המאופיין ע"י ספין לא מאוזן (odd spin), ומבטא את השפעת הקורלציה בין האלקטרונים והספין שלהם על ההולכה.

התפתחות מעניינת אחרת באה מקבוצתו של רון נעמן במכון ויצמן. קבוצה זו בוחנת תהליכי מעבר אלקטרוניים דרך שכבות מולקולריות לא כהולכה בין שתי אלקטרודות אלא כתהליך פליטה אופטית (photoemission) ממתכות המכוסות בשכבות

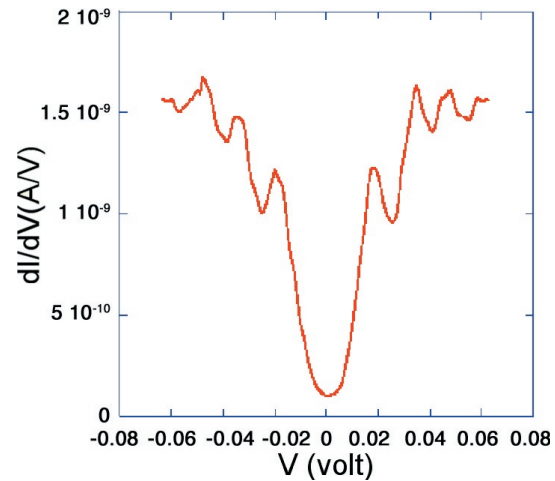
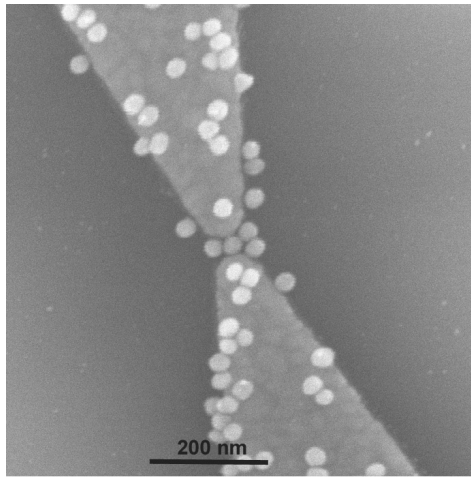
מולקולריות. בחינה של קיטוב האלקטרוניים הנפלטים דרך שכבות מולקולריות קירליות ספוחות על משטחי זהב בעזרת קשר זהב-תיול, מראה ששכבות כאלה יכולות להציג רמה גבוהה של פרומגנטיות²². פרומגנטיות זו נוצרת כנראה באפקט קולקטיבי, ע"י אינטראקציה בין הספינים האלקטרוניים של מולקולות שונות הנוצרת באמצעות קיטוב המתכת עליה הן ספוחות.

כבר הזכרנו את השפעתם האפשרית של אינטראקציות לא אלסטיות על התנהגותם החשמלית של מוליכים מולקולריים. השפעה זו ניתן למדוד באופן ישיר דרך התנהגות הזרם כפונקציה של המתח בניסיון המכונה ספקטרוסקופית מנהור בלתי אלסטית (inelastic tunneling spectroscopy). מבנה הספקטרום המופיע בגרף של נגזרת המוליכות כפונקציה של המתח משקף תהליכי מעבר אנרגיה בין האלקטרון העובר ובין התנדודות היברציוניות של המולקולה. העובדה שהתנהגות זו נצפית²³ מלמדת אותנו על מנגנון מעבר הזרם במולקולה, על התפקיד שממלאת האינטראקציה בין האלקטרון והגרעינים ועל חשיבותה של הסביבה התרמית, במקרה זה היברציות, על תהליך ההולכה. חשיבות מעשית מבחינה ניסיונית נובעת גם מכך שסיגנל לא אלסטי המתאים לתדירות ויברציה מולקולרית מהווה הוכחה חד משמעית לכך שהזרם הנמדד אכן עובר דרך המוליך המולקולרי.

ה. מעבר למוליכות: אתגרים והזדמנויות באלקטרוניקה מולקולרית

השימוש האפשרי במולקולות כמוליכי זרם הוא מעניין לכשעצמו, אבל תכונותיהם הספציפיות של מוליכים אלה חשובות לא פחות. למעשה חלק מהעניין במולקולות כאלמנטים אלקטרוניים נבע מלכתחילה מהאפשרות להשתמש בהן כמישירי זרם וכמתגים²⁴. ואכן יישור זרם ע"י מוליכים מולקולריים, המבטא את העובדה שמוליכות המולקולה יכולה להיות תלויה בכיוון הזרם, הודגם בכמה מעבודות²⁵ ומקורו זוהה כנובע מאסימטריה במבנה מולקולה או בקשרים בין המולקולה והאלקטרודות. התנהגות של מתג, כלומר הופעת שינוי חד והפיך בתכונה חשמלית כפונקציה של פרמטר נשלט (למשל המתח) גם היא נפוצה במוליכים מולקולריים כאלה בגלל הרגישות הרבה של המוליכות למבנה. ציור 6 מראה את שינויי המוליכות הנובעים מתנדודות אקראיות במבנה המגע המולקולרי. התנהגות זו אופיינית לתצפיות הנעשות על מולקולה יחידה, והמזכירה למשל את ההתנהגות האופטית הנצפית בספקטרוסקופיה של מולקולה כזו. אם נצליח לשלוט בתגובות אלה יהיה בידנו מתג. אפשרות אחרת להתנהגות של מתג אפשר למצוא במגע מולקולרי בו לפחות

[†] "התנהגות אוהמית" הוא מונח המאפיין מוליכים "רגילים" המקימים את חוק אוהם, כלומר הזרם העובר בהם נמצא ביחס ישר למתח.



ציר 9. משמאל, תמונת מיקרוסקופ מינהור אלקטרוני של DNA עם חלקיקי-נו של זהב בין שתי אלקטרודות זהב. מימין גרף המוליכות כפונקציה של המתח מראה את המבנה האופייני של Coulomb blockade

הגלאים. ציר 9 מראה תוצאות שעדיין לא פורסמו ממעבדתו של Mirkin שבאוניברסיטת Northwestern: חלקיקי ננו של זהב ברדיוס 14 ננומטר מקושרים ביניהם ע"י שרשרות DNA (בעזרת קשר תילי). מוליכות המערכת המתקבלת מראה תופעות של Coulomb blockade הקשורות בטעינתם של חלקיקי זהב, ובנוסף תלות חזקה של המוליכות במבנה ה-DNA ובהיברידיזציה שלו. תלות זו יכולה לכן לשמש כגלאי למבנה המתאים.

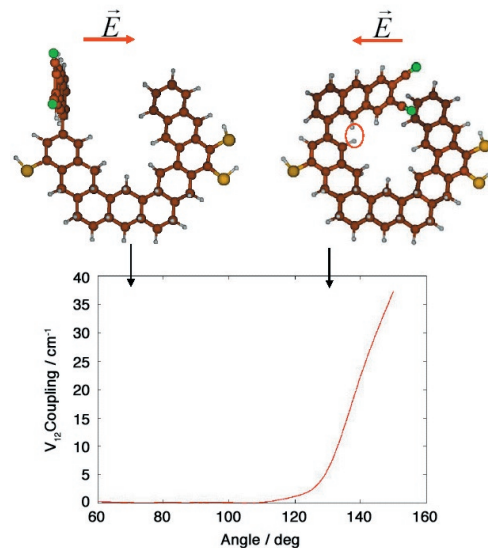
ככלל, תלות חזקה של המוליכות במבנה המולקולה, הקיימת בעיקר בתחום מוליכות המנהור, יכולה לגרום לתופעות מיתוג חדות. ציר 10 מראה דוגמה²⁷ שבה סבוב של קבוצת די-כלורו-נפיתל סביב לקשר מולקולרי משולש יכול לגרום לשינוי בפקטור 100 במוליכות, כלומר לסגירה או פתיחה אפקטיבית של מעגל ההולכה המולקולרי. חישוב זה מדגים שניתן עקרונית לנצל את הדינמיקה הסטראוכימית של המולקולה לשליטה בתכונות של התקן מולקולרי.

אחד השטחים הפעילים ביותר של האלקטרוניקה המולקולרית הוא פיתוח גלאים חדשים. פעולתם של גלאי DNA מבוססת לרוב ע"י קישור גדיל (strand) "מטרה" יחיד עם הגדיל המשלים שלו, ומעקב אחרי הקומפלקס המתקבל על פי מוליכותו, הפלואורסנציה שלו, תכונות פזור אור או שינויים אופטיים אחרים. השימוש בעירור תנודות פלסמוניות משטחיות של חלקיקי מתכת קטנים (surface plasmon resonances) תופס לאחרונה תאוצה בין שיטות הגילוי האלה²⁸.

הזרם העובר דרך מגעים מולקולריים מהווה לעיתים הפרעה כימית המובילה לסוג אפשרי חדש של יצירת מבנים ע"י שימוש בקצה (טיפ) של מיקרוסקופ מנהור כאמצעי להשראת ריאקציה מקומית מתחת לטיפ. עבודתו החלוצית של Ho

אחת האלקטרודות היא מוליך למחצה: ההתנהגות החשמלית במגעים כאלה יכולה להשתנות באופן חד בתחום מתח צר בגלל הרגישות למתח של מבנה צפיפות המצבים של המוליך למחצה בתחום הרמות האלקטרוניות המולקולריות. מרתקות אפילו יותר הן מולקולות בהן מבנה השלד הגרעיני מאפשר כמה נקודות יציבות עם אפשרות מעבר ביניהן²⁶, כאשר קונפיגורציות שונות מתאימות לתכונות הולכה שונות.

גם מולקולות DNA יכולות להתנהג כמתגים בגלל הרגישות הרבה של תכונות הטרנספורט שלהן לשינויים במבנה ההיברידיזציה שלהם. תופעות אלה הן בעלות שימושים בתחום



ציר 10. הדגמה חישובית של תלות המוליכות בקונפיגורציה המולקולרית²⁶.



Computer Wristwatch
IBM/eMagin



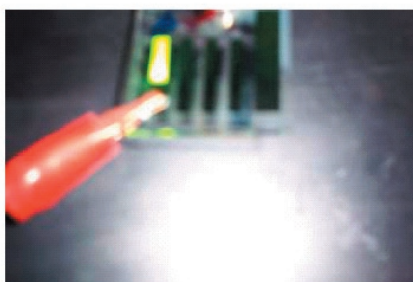
Northwestern Blue
OLED



Autostereo Display
Pioneer



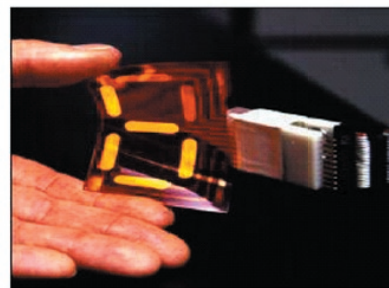
Microdisplay
eMagin



Northwestern Green
OLED



TV Display
Kodak



Flexible OLED
Uniax

ציור 11. מספר דוגמאות למערכות LED המפותחות בתעשייה.

הנוצרים ליד אלקטרודה אחת וחורים שמקורם באלקטרודה האחרת זורמים אלו לקראת אלה דרך התווך האורגני ומגיבים כאשר הם נפגשים על אותה מולקולה ליצירת המולקולה במצב מעורר פולט אור. התוצאה היא מכשיר פולט אור היעיל בהרבה מנורות חשמל רגילות. ציור 11 מראה תמונות של מבני LED המתחילים כיום להופיע בשוק המסחרי. מערך משטחי של אלמנטים כאלה יכול להחליף את הגבישים הנוזליים במסכי תצוגה כמו אלה של מחשבים ושעונים. כוון פיתוח אחר של האופטו-אלקטרוניקה הוא החישוב האופטי, המבוסס על מפקקים אופטיים שהשליטה בהם, כלומר עבוד הנתונים, נעשית בעזרת אותות אופטיים אחרים. השילוב בין ערוור אופטי ובין תכונות ההולכה החשמלית של חומרים מולקולריים הוא דרך נוספת להשגת שליטה בתגובות של מערכת כזו. העקרונות האלה הודגמו במספר מערכות, בין השאר במעבדתו של זהר אמיתי בטכניון³² (בשיתוף עם קבוצתיהם התיאורטיות של רוני קוזלוב באוניברסיטה

הראתה שזרם אלקטרוניים העובר דרך מולקולות פחמימנים יכול לגרום ליציאתם של אטומי מימן מהמולקולה²⁹. מחקר בקבוצתו של יעקב סגיב במכון וייצמן הראה שניתן להשתמש בזרם העובר בין טיפ מתכתי למשטח מתכת המצופה בשכבה מונו-מולקולרית מתאימה כדי לגרום לריאקציות חמצון-חיזור מקומיות על המשטח ובצורה זו ליצור מבנים שישמשו כמערכת הכרה מולקולרית³⁰. תמר זיידמן, היום באוניברסיטת נורת'וסטרן, הכלילה את תאורית ההולכה החשמלית שתוארה למעלה כדי להסביר ולחזות את מהלכן של ריאקציות כימיות בהשפעת זרם חשמלי דרך מגעים מולקולריים³¹. אופטו-אלקטרוניקה היא הכינוי לתחום המחקר המתאר את השפעת הגומלין בין אור ובין הדינמיקה האלקטרונית בתווך נתון. פיתוח של דיאודות אורגניות פולטות אור מהווה את אחת ההצלחות הגדולות של תחום זה. דיאודות אלה משתמשות במולקולות אורגניות עם קבוצות כרומופוריות פולטות אור כחלק ממבנה הולכה מולקולרי. אלקטרוניים

והן באספקטים התיאורטיים של התנהגות מולקולרית בסביבה מסוג שונה ותחת תנאי שפה שלא נחקרו עד כה.

References

- ¹ (a) J. Jortner and M. Bixon, in *Advances in Chemical Physics*, edited by I. Prigogine and S. Rice (Wiley, New York, 1999), Vol. 106, (b) C. Joachim, J. K. Gimzewski, and A. Aviram, *Nature* 408, 541 (2000), (c) A. Nitzan, *Ann. Rev. Phys. Chem.* 52, 681 (2001), (d) P. Hanggi, M. Ratner, and S. Yaliraki, 2002, Vol. *Chemical Physics*, 281, 111-502, J. R. Heath and M. A. Ratner, *Physics Today* 56(5), 43 (2003), (e) A. Nitzan and M. Ratner, *Science* 300, 1384 (2003), (f) D. M. Adams, L. Brus, C. E. D. Chidsey, et al., *J. Phys. Chem. B* 107, 6668 (2003)
- ² Q. Huang, J. Cui, J.G.C Veinot, H. Yan and T.J. Marks, *Appl. Phys. Lett.*, 82, 331 (2003)
- ³ J. Sagiv, *J. Am. Chem. Soc.* 102, 92 (1980)
R. Maoz, E. Frydman, S.R. Cohen and J. Sagiv, *Adv. Mat.* 12, 725 (2000)
- ⁴ R. Bashir, *Superlattices and microstructures*, 29, 1 (2001)
- ⁵ A. Carrillo, J. A. Swartz, J. M. Gamba, et al., *Nano Lett.* 3, 1437 (2003)
- ⁶ J. D. Hartgerink, E. Beniash, and S. I. Stupp, *Science* 294, 1684 (2001)
- ⁷ G. V. Nazin, X. H. Qiu, and W. Ho, *Science* 302, 77(2003)
- ⁸ H. Kuhn, *Pure and Appl. Chem.* 51, 341 (1979)
- ⁹ M. Dorogi, J. Gomez, R. Osifchin, et al., *Phys. Review B-Condensed Matter* 52, 9071 (1995)
- ¹⁰ J. Park, et al., *Nature* 417, 722-725 (2002).
- ¹¹ Y. Selzer, M. A. Cabassi, T. S. Mayer, Y. Yao, J. M. Tour and D. L. Allara, to be published
- ¹² X. D. Cui, A. Primak, X. Zarate, et al., *Science* 294, 571 (2001),
B. Xu and N. J. Tao, *Science* 301, 1221 (2003)
- ¹³ Z. J. Donhauser, B. A. Mantooth, K. F. Kelly, et al, *Science* 292, 2303 (2001)
- ¹⁴ G. K. Ramachandran, T. J. Hopson, A. M. Rawlett, et al., *Science* 300, 1413 (2003)
- ¹⁵ R. Landauer, *IBM J. Res. Dev.* 1, 223 (1957),
Y. Imry, *Introduction to Mesoscopic Physics* (Oxford University Press, Oxford, 1997)
- ¹⁶ S. Datta, *Electric transport in Mesoscopic Systems*

העברית ומשה שפירא במכון וייצמן), והשטח ממשיך לעורר עניין רב.

הדיון שלנו בנושא האלקטרוניקה המולקולרית החל בהזכרת "חוק" Moore ובחינה של השימוש האפשרי במולקולות כאלמנטים לוגיים או יחידות זיכרון במערכת אלקטרונית. גישות שונות נוסו במסגרת זו. הראשונה, ואולי הפשוטה ביותר, מבוססת על השימוש במולקולות כמקשרים (interconnects), מפסקים, שערים (gates), קבלים ואולי גם יחידות השראות (inductors). כעקרון ניתן להכתיר את עיקר המאמץ בתחום זה כניסיון לפתח טרנזיסטור מולקולרי. עדין לא הגענו לתוצאה מסחרית של מאמץ זה ואולם האפשרות לבנות מעגלים מבוססים על מולקולות היכולים לשמש כהתקני זיכרון ולוגיקה נבחנת בימים אלה. כמו כן הודגמה כבר פעולתם של התקנים מולקולריים בהם העברת האינפורמציה מבוססת על עקרונות אחרים: שימוש בשורה של סביבונים מולקולריים המסוגלת להעביר סיגנל חשמלי-מכני³³, אוטומטים סולולאריים מולקולריים (molecular cellular automata) המעבירים סיגנל ע"י השראה הדדית בין קונפיגורציות שונות לאורך שרשרת מולקולרית³⁴ ועוד. המאמץ בתחום זה מכון, כפי שכבר אמרנו, להשגת אמצעי חישוב המבוסס על תכונות מולקולריות, כאשר ברקע ניצבת ההבטחה הגלומה באפשרות ליצור מבנים מולקולריים מתאימים בעלות נמוכה בעזרת היבנות עצמית, וזאת בניגוד לעלות הגבוהה הצפויה ממזעור נוסף של מחשב הסיליקון.

1. סכום

בחוגים שונים מדובר על נווטכנולוגיה כעל "הרעיון הגדול הבא", ואנו רואים גידול עצום בעניין המסחרי בכל האספקטים של מדע הנוו, כולל אלקטרוניקה מולקולרית. האפשרויות שהוזכרו למעלה: מכונות מולקולריות, דיאודות מולקולריות פולטות אור, טרנזיסטורים מולקולריים, מתגים, מחשבים וגלאים מולקולריים מסוגים שונים, הן רק חלק ממספר הרעיונות שהועלו בשנים האחרונות. השימוש באלקטרוניקה מולקולרית בתהליכי המרת אנרגיה אור השמש לאנרגיה חשמלית גם הוא אפשרות שיש לה התחלות במעבדה. התגשמותה המעשית של אפשרות כזו פרושה מתן אמצעים ליצירת אנרגיה ללא זיהום אויר, ללא פליטת פחמן דו חמצני וללא האפשרות ההרסנית לשינוי אקלים עולמי. להתגשמותן של אפילו חלק מאפשרויות אלה תהיה השפעה אדירה על החברה בה אנו חיים. השגת מטרת אלה לא תהייה קלה ובוודאי שלא מהירה, ואולם חלק מהתגליות בתחום זה כבר עבר משלב המחקר המדעי אל שלב הפיתוח הטכנולוגי. גם מהבחינה המדעית הטהורה ממשיך תחום המחקר הזה להציב בפנינו אתגרים מרתקים הן בתחום הסינתזה והבניה של מבנים מולקולריים מורכבים, הן בשאלת המעקב אחרי תכונות מולקולריות, כגון הולכת חשמל וחום, שעד לפני זמן קצר נמדדו רק בהקשרן המאקרוסקופי,

(Cambridge University Press, Cambridge, 1995)

¹⁷ D. Segal, A. Nitzan, W. B. Davis, et al., J. Phys. Chem. B 104, 3817 (2000)

¹⁸ F. Anariba and R. L. McCreery, J. Physical Chemistry B 106 (40), 10355 (2002)

¹⁹ A. Nitzan, J. Phys. Chem. A 105, 2677 (2001)

²⁰ R. A. Wolkow, Jpn. J. Appl. Phys. 1, 40 (2001); M. C. Hersam et al, Nanotechnology 11, 70 (2000)

²¹ I. Carmeli, G. Leitun, R. Naaman, et al., J. Chem Phys. 118, 10372 (2003)

²² J. R. Hahn and W. Ho, Phys. Rev. Lett. 87 (2001), N. Lorente, M. Persson, L. J. Lauhon, et al., Phys. Rev. Lett. 86, 2593 (2001)

²³ A. Aviram and M. A. Ratner, Chem. Phys. Lett. 29, 277 (1974);

D. H. Waldeck and D. N. Beratan, Science 261, 576 (1993)

²⁴ See, e.g. (a) R. M. Metzger, J. Solid State Chemistry 168, 696 (2002);

(b) Y. J. Zhang, Y. Li, Q. Liu, et al.,

Synthetic Metals 128, 43 (2002)

²⁵ C. P. Collier, G. Mattersteig, E. W. Wong, et al, Science 289, 1172 (2000)

²⁶ A. Troisi and M.A. Ratner, to be published

²⁷ A. D. McFarland and R. P. Van Duyne, Nano Letters 3, 1057 (2003)

²⁸ L. J. Lauhon and W. Ho, Phys. Rev. Lett. 84, 1527 (2000)

²⁹ R. Maoz, E. Frydman, S. R. Cohen and J. Sagiv, Adv. Materials 12, 725 (2000)

³⁰ T. Seideman, J. Physics-Condensed Matter 15, R521 (2003)

³¹ J. Vala, Z. Amitay, B. Zhang, S. R. Leone, and R. Kosloff, Phys. Rev. A 66, 062316 (2002).

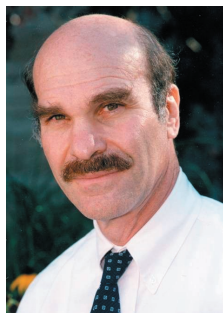
³² S. W. DeLeeuw, D. Solvason, M. A. Ratner, et al., J Phys Chem B 102, 3876 (1998);

J. Vacek and J. Michl, Proc. Natl. Acad. Sci USA 98, 5481 (2001)

³³ C. S. Lent and B. Isaksen, IEEE Trans. Electron Device 50, 1890 (2003)

פרופ' מרק רטנר

מרק רטנר נולד בקליבלנד, למד באוניברסיטת הארוורד ועשה את עבודת הדוקטורט שלו באוניברסיטת Northwestern. את תקופת הפוסט דוקטורט בילה בדנמרק ובמינכן. לימד חמש שנים באוניברסיטת ניו-יורק לפני שעבר לאוניברסיטת Northwestern בשנת 1975. שם כהן כראש



המחלקה לכימיה, כמשנה לדקן הפקולטה למדעים ואומנויות, כראש קבוצה במרכז למחקר חמרים, כאחד המנהלים של המכון לננו-טכנולוגיה וכמכין הקפה של הקבוצה לכימיה תיאורטית. מאז שנת 2000 הוא מחזיק בקתדרת מוריסון. מחקריו הם בתחומי הדינמיקה של תהליכים כימיים, האלקטרוניקה המולקולרית, חקר המבנים של מקרומולקולות ביולוגיות ושינוייהם והולכה יונית בפולימרים. בנוסף לפרסי המורה המצטיין שקבל פעמים רבות הוא מחברם (בשיתוף) של שני ספרים וכארבע מאות מאמרים מדעיים. הוא מקיים קשרים הדוקים עם המדע הישראלי ובין השאר הוא חבר בחברי הנאמנים של אוניברסיטת ת"א ושל האוניברסיטה העברית. הוא זכה במלגת Sloan בשנת 1972, הוא קבל את פרס Feynman בשנת 2001 ונבחר כעמית של החברה האמריקאית לפיזיקה, כחבר באקדמיה האמריקאית לאומנויות ומדעים וכחבר באקדמיה הלאומית למדעים.

פרופ' אברהם ניצן

אברהם ניצן נולד בישראל בשנת 1944. למד כימיה באוניברסיטה העברית במסגרת העתודה האקדמית, וסיים שם תואר ראשון ב-1964 ותואר שני (עם פרופסור גדעון שפסקי) ב-1966. את עבודת הדוקטורט עשה באוניברסיטת ת"א



בהזדקת פרופסור יהושע יורטנר וסיימה בשנת 1972. לאחר פוסט-דוקטורט ב-MIT כמלגאי פולברייט, ושנת עבודה כאסיסטנט-פרופסור באוניברסיטת Northwestern ובעמית מחקר באוניברסיטה של שיקגו, הוא חזר לאוניברסיטת ת"א ב-1975. הוא מכהן שם כפרופסור מן המניין מאז 1982 להוציא שנה (1991) בה היה פרופסור אורח במכון ויצמן. באוניברסיטת ת"א כהן ניצן כראש בית הספר לכימיה בשנים 7-1984, וכדקן הפקולטה למדעים מדויקים בשנים 8-1995. מחקריו מתמקד בתחום הדינמיקה הכימית ותופעות טרנספורט בפאזות מעובות ובמשטחים בין פאזיים. זכה בפרס קולטהוף (1995), בפרס הומבולדט (1995) ובפרס החברה הישראלית לכימיה (2002), ונבחר כעמית של החברה האמריקאית לפיזיקה (APS) ושל האגודה האמריקאית לקידום המדע (AAAS).