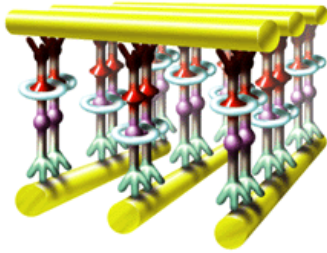




## אלקטרוניקה מולקולרית

פרופ' רון נעמן, המחלקה לפיזיקה כימית, מכון ויצמן למדע

### חלום שמתגשם?



מאמץ רב מוקדש כיום לפיתוחן של מערכות אלקטרוניות המבוססות על מולקולות אורגניות. מקווים, שבעזרת מערכות אלה יהיה אפשר להמשיך וליעל את הרכיבים המיקרואלקטרוניים, שכן הטכנולוגיה הקיימת מתקרבת למיצויה.

האלקטרוניקה מבוססת על רכיבים, שהזרם העובר דרכם ניתן לשליטה על ידי אות חיצוני. הדור הראשון של האלקטרוניקה המודרנית החל עם המצאת שפופרת הריק והטריודה, שאפשרו את פיתוח המחשבים הראשונים בתקופת מלחמת העולם השנייה. שפופרות הריק נעלמו עם המצאת הטרנזיסטור. הטרנזיסטורים, שהם הדור השני של האלקטרוניקה, אפשרו את מזעור ההתקנים האלקטרוניים והפכו אותם למהירים וזולים. כל רכיב אלקטרוני, או כפי שהוא נקרא היום, שבב, מכיל מיליוני טרנזיסטורים.

השבבים מיוצרים על ידי תהליך של "הדפסה" של פסי מתכת על גבי לוחות מוליכים למחצה. תהליך זה מתבצע בשלבים, כאשר הדפסת המעגל האלקטרוני נעשית על ידי כיסוי משטח המוליך למחצה בציפוי מתכת ומעליו ציפוי של שכבת פולימר. כל המערך הזה נחשף לאור דרך "מסכה" שהוכנה מראש בתבנית המעגל החשמלי המבוקש. במסיכה חורים המאפשרים חדירת אור במקומות אותם אנו מבקשים להשאיר כקווי מתכת. המתכת שלא נחשפה לאור נשטפת מפני השטח. ככל שקווי המתכת צרים יותר – ניתן לצופף מספר רב יותר של טרנזיסטורים על יחידת שטח. וכך להפוך את הרכיב האלקטרוני למהיר יותר. בעשורים האחרונים התפתחה תעשיית רכיבי המיקרואלקטרוניקה בצעדי ענק והצליחה להגביר את מהירות הרכיבים מדי שנה. כיום, הטכנולוגיה הגיעה לשיא ברכיבים המבוססים על "הדפסה", כאשר יכולת ההפרדה (רזולוציה) היא 0.18 מיקרון, או 180 ננומטר.

כדי להאיץ עוד יותר את פעולת הטרנזיסטורים, נחוצים פסי מתכת דקים יותר. לשם כך דרושה יכולת הפרדה טובה בתהליך ה"הדפסה". כאמור, בתהליך זה משתמשים באור. ככל שאורך הגל של האור קצר יותר, ניתן למקד אותו בשטח קטן יותר, וכך לקבל יכולת הפרדה גבוהה יותר. הבעיה היא, שקשה להפיק אור בעוצמה מספקת באורכי גל קצרים. כמו כן, הרכיבים האופטיים (עדשות ומראות) הנדרשים לשם כך יקרים מאוד.

המזעור גורם לבעיות נוספות :

- מעבר הזרם בפסי המתכת יוצר חום. ככל שהרכיב צפוף יותר, נוצר יותר חום בכל יחידת שטח. חום זה עשוי להרוס, בסופו של דבר, את הרכיב.
- בגלל המזעור, הרגישות לשגיאות הולכת וגדלה, ואילו אמצעי הבדיקה הקיימים חסרים את היכולת לגלות שגיאות ביעילות.

לאור הקשיים האלה, קודם הרעיון לבנות אלקטרוניקה על בסיס שונה, ולהשתמש במולקולות אורגניות כתחליף לטרנזיסטורים המבוססים על מוליכים למחצה. בסקירה זו יידונו יתרונות (למראית עין, לפחות) השימוש במולקולות אורגניות, הבעיות העולות מכך וכמה רעיונות לעקיפת חלק מהבעיות.

## יתרונות המולקולות האורגניות

מולקולות אורגניות הן בעלות תכונות פיזיקליות וכימיות מגוונות. אורכן הטיפוסי כ- 1 ננומטר, כלומר פחות מאחוז אחד מגודלו של הטרנזיסטור החדש ביותר. יש להניח, שאם נצליח להשתמש במולקולה כבטרנזיסטור, נצליח להקטין את גודל הרכיב הבסיסי במידה ניכרת. כמו כן, למולקולות יש תכונות פיזיקליות רבגוניות יותר משל הטרנזיסטורים הקיימים. תכונות אלה עשויות ליעל ולהרחיב את שימושי הטרנזיסטור<sup>1</sup>.

לדוגמה: בליעת האור של הטרנזיסטורים הקיימים מאופיינת בפס בליעה רחב מאוד וחסר מבנה; בליעת האור של מולקולות מאופיינת, בדרך כלל, על ידי מבנה המורכב ממספר רב של קווי בליעה. תכונה זו תאפשר, למשל, להעביר מידע אל המולקולה באמצעות אור ולהשתמש בצבעים שונים כדי להעביר במקביל כמה יחידות מידע שונות. הדבר יאיץ את העברת המידע ואת עיבודו. אפשר יהיה גם להשתמש בשפה מורכבת יותר מהשפה הבינרית, שבנויה רק על 0 ו-1, אשר משמשת בטרנזיסטורים הקיימים. תכונה ייחודית נוספת היא, שלמולקולות יש יכולת "להכיר" מולקולות אחרות. הודות לתכונה זו, ייתכן שיהיה אפשר לשלב ביתר קלות גלאים במערכות אלקטרוניות.

יתרון חשוב נוסף של המולקולות הוא היכולת לייצר מהן כמויות עצומות ללא שגיאות. כמו כן, ההיגיון אומר, שכאשר מגיעים למזעור כה רב, כדאי לבנות את הרכיבים "מהבסיס למעלה", ולא על ידי גריעה מלמעלה למטה. במיקרואלקטרוניקה המקובלת מתחילים ממבנה גדול ומחלקים אותו למבנים קטנים, ואילו במולקולות מתחילים מאטומים ובונים מהם מבנה גדול ומורכב יותר.

לפי המתואר עד כאן, נראה שלמולקולות אורגניות עשויים להיות יתרונות על פני מוליכים למחצה בבניית טרנזיסטורים. ואולם, יישום היתרונות הללו במערכת בת ייצור מעלה בעיות לא פשוטות.

## חסרונות המולקולות האורגניות

הבעיות המתעוררות בשימוש במולקולות אורגניות הן בתחומי המזעור ועמידות המולקולות. ראשית נתייחס למזעור. נכון שהמולקולה קטנה הרבה יותר מכל טרנזיסטור, אך עלינו לזכור שיש לחבר את המולקולה אל הסביבה כדי למסור ולקבל מידע. את הקשר אל הסביבה מספקים מגעים חשמליים, ובהעדר חלופות ראויות, שוב נייצר מבנים חשמליים באותה הצורה שבה מיוצרים הרכיבים הקיימים. הטרנזיסטור שנייצר אולי יהיה קטן יותר, אבל החיבור אליו ייעשה בטכנולוגיה הישנה. מכיוון שהרכיב

מכיל גם את הטרנזיסטור וגם את המגעים שלו, יקבעו ממדי המגעים את גודלו הסופי של הרכיב. לא די אפוא להראות שמולקולה יחידה יכולה לפעול כטרנזיסטור, אלא יש לפתח גם שיטה הולמת לחיבור המולקולה אל המערכת האלקטרונית.

בעיה נוספת המחייבת התייחסות היא העמידות של מולקולות אורגניות למעבר זרם דרכן. רוב המולקולות נוטות להתפרק כאשר עובר דרכן זרם חזק. גם אם מניחים שבביצוע פעולה לוגית אחת עובר דרך המולקולה רק אלקטרון אחד, צריכים לעבור דרך המולקולה כ- $10^8$  אלקטרונים בשנייה כדי שהרכיב יעבוד במהירויות המקובלות היום. בשטף כזה של אלקטרונים, רוב המולקולות ייהרסו (הקשרים בין האטומים שלהן יתפרקו) בתוך כמה שניות.

### שילוב מולקולות אורגניות בטכנולוגיה הקיימת

למרות המגרעות שצוינו לעיל, האפשרות לייצר כמות גדולה של מולקולות ללא שגיאות ומגוון התכונות שתוארו לעיל מצדיקים את המאמץ לפתח רכיבים אלקטרוניים הבנויים ממולקולות אורגניות. אולם, ייתכן שהשימוש במולקולות יחייב שינוי מושגי בבניית רכיבים אלקטרוניים, וקרוב לוודאי שלא ניתן יהיה להחליף רכיב כפי שהוא מיוצר היום ברכיב שהוא מולקולה.

כדי לנצל את התכונות של מולקולות אורגניות ולהתגבר על חסרונותיהן, פותחו במעבדתנו התקנים המשלבים מולקולות אורגניות עם רכיבים של מוליך למחצה רגיל<sup>2</sup>. ההתקן החדש הוא "טרנזיסטור מוליך למחצה הנשלט על ידי תכונות מולקולריות" (MOCSE - Molecular Controlled – Semiconductor Resistor).

הרכיב מבוסס על טכנולוגיית GaAs הידועה, ובנוי כך שהזרם דרכו זורם קרוב מאוד לפני השטח. כתוצאה מכך, הזרם העובר דרך הטרנזיסטור רגיש מאוד לכל שינוי הקורה על פני השטח של הרכיב. אל פני השטח קשורות מולקולות אורגניות שתוכננו והוכנו כך שהן מסוגלות לבצע שני תפקידים. חלק אחד של המולקולה נספח אל פני השטח של הטרנזיסטור, וחלק אחר מסוגל לקשור באופן ספציפי חומר כימי מסוים, כפי שנבחר מראש. בגלל הרגישות הרבה של הזרם למתרחש על פני השטח, כל שינוי שחל במולקולות גורם לשינוי בזרם שעובר דרך הטרנזיסטור.

תופעה זו מאפשרת להשתמש בטרנזיסטור כגלאי באופן זה: כאשר המולקולה קושרת חומר מסוים, משתנה חלוקת המטען החשמלי על פני המולקולה, ועל כן משתנה הזרם העובר דרך הטרנזיסטור. ניתן לספוח מולקולות המגיבות באופן שונה עם חומרים כימיים שונים. בחירה נכונה של המולקולות מאפשרת לשלוט בזרם לפי הצורך. יתרונה של המערכת בכך, שזרם אינו עובר דרך המולקולות האורגניות, ולכן הן אינן מתפרקות כתוצאה מעבודה ממושכת של הרכיב.

המולקולות המשמשות לגילוי מסתדרות על פני המוליך למחצה בשכבה חד-מולקולרית מסודרת, ותגובת הרכיב פרופורציונית למספר המולקולות שנקשרו על פניו. על פני שטח של רכיב טיפוסי שגודלו כ-0.1 מ"מ נקשרות כ- $10^{12}$  מולקולות. די בשינוי של פחות מאלפית מטען אלקטרון במולקולה כדי שהזרם ברכיב ישתנה במידה ניכרת.

רגישות ה-MOCSEr מאפשרת להשתמש בו גם כ"מחשב כימי", שכמות הזרם העובר דרכו תלויה בסביבה המכילה מספר רכיבים. לדוגמה, נבנה רכיב, שהזרם דרכו גדל כאשר הוא נחשף למים וקטן כאשר הוא נחשף לחמצן. ברכיב כזה ניתן לבצע פעולה לוגית "כימית": כאשר הטורניסטור נחשף לחמצן בלבד, הזרם קטן (-1), כאשר הוא נחשף למים בלבד, הזרם גדל (+1), וכאשר הוא נחשף לשני החומרים גם יחד – הזרם אינו משתנה (0). נקבל את הטבלה הלוגית הבאה:

מים	חמצן	אות חשמלי
+	0	+1
0	+	-1
+	+	0

"מחשב כימי" כזה עשוי לשמש, לדוגמה, כחלק ממערכת אינטראקטיבית להזרקת תרופה המושתלת בתוך הגוף. הוא יוכנס לגוף ביחד עם מערכת הזרקת תרופה, וזו תופעל בהתאם לתגובת ההתקן לסביבה המכילה מספר רכיבים החשובים למינון התרופה.

## מבט לעתיד

מהדוגמה ברור, שהשימוש במולקולות אורגניות כחלק מהתקן אלקטרוני, אינה מהווה פתרון כללי לבעיית מיזעור האלקטרוניקה. היא יכולה לשמש לרכיבים בעלי פונקציות מיוחדות, ובייחוד לפעולה במערכות ביולוגיות.

הגלאי שפותח יכול לשמש גם בשילוב עם מולקולות ביולוגיות. כאשר ייספחו על פניו מולקולות ביולוגיות בעלות יכולת הכרה ספציפית, יהיה אפשר להשתמש בו כגלאי ביולוגי. מעבדות מחקר שונות מפתחות רעיונות נוספים לשילוב מולקולות אורגניות ברכיבים אלקטרוניים, אך רובם טרם הבשילו לכלל בניית אב טיפוס. למשל, הוצע להשתמש במולקולות לא להולכת זרם, אלא להעברת מידע על ידי שינוי של חלוקת המטען עליהן. הפעלת שדה חשמלי על מולקולה משנה את חלוקת המטען עליה, והשינוי תלוי במבנה הכימי של המולקולה. ניתן אפוא לבצע פעולות לוגיות על ידי שינוי חלוקת המטען על המולקולות.

השיטה המוצעת פותרת שתי בעיות חשובות:

- מכיוון שלא עובר זרם דרך המולקולות, הן אינן מתפרקות.
- מכיוון שלא עובר זרם לא נוצר חום, ובעיית ההתחממות של הרכיבים נפתרת.

הבעיה החשובה, שלה אין כרגע פתרון, היא כיצד לחולל שינויים מבוקרים בחלוקת המטען על המולקולות וכיצד לקרוא שינויים אלה, כלומר, כיצד לדעת שאמנם השתנתה חלוקת המטען. לעת-עתה, עלינו להתמקד בפיתוח רכיבים המשלבים בתוכם מולקולות אורגניות ומאפשרים שימוש בתכונות הכימיות של המולקולות למטרות חישה.

## לסיכום

השימוש במולקולות כרכיבים אלקטרוניים נראה מבטיח, אבל הדרך להגשמת רעיון מהפכני זה ארוכה. כרגע נראה, שחסרים כמה מרכיבים בסיסיים (כמו יצירת המגע עם המולקולות), שבלעדיהם לא תיתכן התקדמות משמעותית בתחום. כפי שקרה בשעתו עם המצאת הטורניסטור וכטבען של המצאות, הדור

השלישי של האלקטרוניקה המודרנית עשוי להופיע מכיוון בלתי צפוי. האלקטרוניקה המולקולרית אמנם אינה חלום באספמיה, אך שימוש נרחב במולקולות אורגניות כתחליף לטרנזיסטורים הקיימים עדיין אינו מציאות הממתינה מעבר לפינה.

## מקורות

1. a) Molecular Electronic Devices, ed. F.L. Carter, Marcel Dekker, New York (1982);  
b) G.J. Ashwell ed. "Molecular Electronics", Research Studies Press Ltd. (1992).
2. Gartsman, K., D. Cahen, A. Kadyshevitch, J. Libman, T. Moav, R. Naaman, A. Shanzer, V. Umansky, and A. Villan, "Molecular control of GaAs transistor", Chem. Phys. Lett., 283, 301, (1988); Vilan, A., R. Ussyshkin, K. Gartsman, D. Cahen, R. Naaman, and A. Shanzer, "Real-Time Electronic Monitoring of Adsorption Kinetics: Evidence for Two-Site Adsorption Mechanism of Dicarboxylic Acids on GaAs (100)", J. Phys. Chem. B, 102, 3307, (1988).