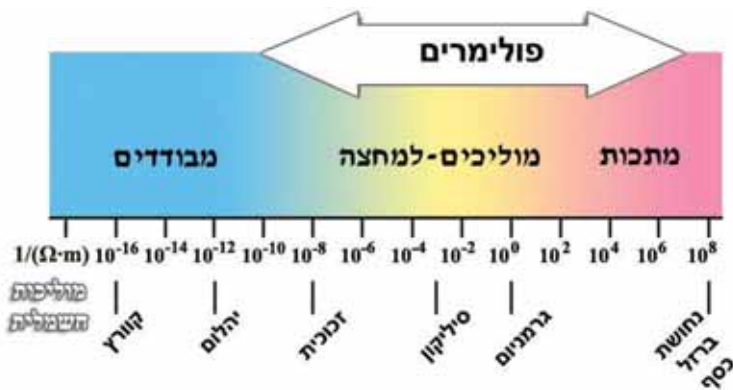


מריאנה קורז'וב, רפי שיקלר ודוד אנדלמן

פלסטיק שמוליך חשמל?

על דור חדש, מרהיב ומלהיב, של אלקטרוניקה פלסטית



איור 1 | המוליכות החשמלית הסגולית של מתכות, מוליכים-למחצה, מבודדים ופולימרים מוליכים למיניהם משתרעת על מספר רב של סדרי גודל ונמדדת ביחידות של אחד חלקי אהם-מטר

בסוף שנות השבעים של המאה ה-20 הצליחו כמה קבוצות מחקר לייצר חומרים פלסטיים המסוגלים להוליך זרם חשמלי. חומרים אלה, שכוננו "מתכות סינתטיות", פתחו כר נרחב של פעילות מדעית ושל שימושים מגוונים שלא היו קיימים קודם לכן. במאמר זה נסביר מהם חומרים פלסטיים מוליכים, ונציג מגוון רחב של שימושים מפתיעים ומעניינים לחומרים אלה, החל מרכיב אלקטרוני קטן ועד מסכי תצוגה שלמים, ושימושים רבים נוספים.

מוליכים, מבודדים ומוליכים-למחצה

בטרם נסביר כיצד גורמים לפלסטיק להוליך חשמל, נבהיר את מושג "פסי האנרגיה" במוצקים, המסביר את ההבדלים בין מוליכים, מוליכים-למחצה ומבודדים (וראו: ג'ודי ואריה מלמד-כץ, "המהפכה הסולארית", "גליליאו" 107, בעיקר עמ' 27). ההסבר מבוסס על אחת ההצלחות הגדולות של תורת הקוונטים במאה ה-20, הצלחה שהביאה להולדת הטרנזיסטור ב-1948, המעגלים האלקטרוניים המשולבים וכל תעשיית המיקרו-אלקטרוניקה בת זמננו.

לפי תורת הקוונטים, אלקטרונים הקשורים לאטומים אינם יכולים להיות בעלי אנרגיה כלשהי, אלא רק בעלי

החומרים הפלסטיים ידועים כחומרים מבודדים, ואחד משימושיהם הנפוצים הוא כציפוי מבודד לחוטי החשמל, שנועד למנוע קצרים. לפני כ-30 שנה התגלה דור חדש של חומרי פלסטיק בעלי תכונות הפוכות: הם מוליכים חשמל ויכולים אפילו להחליף את הסיליקון בשבבי המחשב. כיום תעשיית האלקטרוניקה עושה שימוש נרחב בחומרים אלה עקב תכונותיהם החשמליות הייחודיות, המצטרפות לגמישותם ולאפשרות לעבד אותם. פלסטיק מוליך חשמל פותח צוהר למגוון שימושים ולאפשרויות מרתקות.

כולנו יודעים מניסיוננו בחיי היומיום, שחוט מתכת מוליך חשמל ואילו חוט ניילון או סיב זכוכית פועלים כמבודדים. אבל מהו המקור הפיזיקלי להבדל בין חומרים מוליכים ומבודדים? המוליכות החשמלית של מוצקים היא אחת התכונות החשובות ביותר המבדילות בין חומרים שונים, והיא תלויה בריכוז האלקטרונים החופשיים בחומר. אלקטרונים אלו נקראים "אלקטרוני הולכה". הם אינם קשורים לאטומי החומר ואף אינם משתתפים בקשרים כימיים בין האטומים, אלא יוצרים מעין ענן של אלקטרונים חופשיים הנעים בקלות בתוך החומר בהשפעת מתח חשמלי. ככל שריכוז אלקטרונים אלה גדול יותר, כך החומר מוליך חשמל בצורה טובה יותר. למתכות, כגון נחושת, כסף וברזל, יש כמות גדולה של אלקטרוני הולכה (בין אחד לארבעה אלקטרונים לכל אטום), ולכן הן מוליכות מצוינות (איור 1). לעומת זאת, בחומרים מבודדים כגון עץ, זכוכית או חרס, כמעט כל האלקטרונים קשורים (אין אלקטרונים חופשיים) ולכן המוליכות החשמלית שלהם גרועה, עד כדי פי 10⁻²⁵ ביחס למוליכות של מתכות! עם המבודדים (איור 1) נמנים סוגים רבים של חומרים לא-מתכתיים, ובהם גבישים מולקולריים או יוניים (קוורץ, סוכר ומלח בישול) וכן חומרים קרמיים ופלסטיים. סוג נוסף הוא של חומרים התופסים את תחום הביניים בין המבודדים למוליכים: ה"מוליכים-למחצה", דוגמת הסיליקון. בחומרים אלו ניתן לשנות את המוליכות במספר רב של סדרי גודל על-ידי שינוי בטמפרטורה או החדרה מבוקרת של זיהומים, כפי שנעשה בתעשיית האלקטרוניקה.

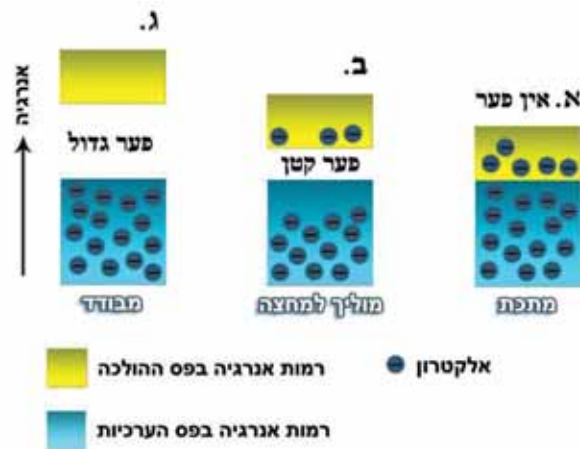
● אם פס ההולכה ריק ופס הערכיות מלא, ישנה אפשרות שאלקטרונים "יקפצו" מפס הערכיות המלא לפס ההולכה הריק. צורת הולכה זו, על-ידי אלקטרונים הקופצים לתוך פס ההולכה, ייחודית לחומרים כגון סיליקון, הנקראים מוליכים-למחצה (איור 2). על מנת שהאלקטרון יוכל "לקפוץ" מפס הערכיות לפס ההולכה צריכים להתקיים שני תנאים: פער האנרגיה בין הפסים צריך להיות קטן מספיק, וכן הטמפרטורה צריכה להיות גבוהה מספיק, כדי שהאלקטרונים יוכלו להתגבר עליו. מוליכים-למחצה כגון סיליקון, המצוי בבסיסם של כל שבבי המחשב, מקיימים תנאים אלו. בטמפרטורות נמוכות מאוד הם מבודדים, כי פס הערכיות שלהם מלא באלקטרונים, ואילו בטמפרטורת החדר, ובעיקר בטמפרטורות גבוהות של מאות מעלות צלזיוס, מספר הולך ורב של אלקטרונים "קופץ" לתוך פס ההולכה הריק ומשתתף בהולכה החשמלית. ואולם, כפי שמדגים איור 1, מוליכותם אינה טובה כמו של מתכות, ומכאן שמם – "מוליכים-למחצה".

סימום (Doping) של מוליכים-למחצה

על מנת שמוליכים-למחצה יוכלו להיות שימושיים ברכיבים אלקטרוניים, חייבים להגדיל במידה ניכרת את מוליכותם החשמלית בטמפרטורת החדר. דבר זה נעשה בתהליך המכונה "סימום" או "אילוח" (doping), שבו מוחדרת לחומר כמות קטנה של אטומים "מזהמים" מיוחדים. לאטומים מזהמים אלו יש תכונה מיוחדת: הם תורמים בקלות אלקטרונים לפס ההולכה, או גורעים מקצת האלקטרונים שבפס הערכיות ויוצרים "חורים", המתנהגים כאילו היו חלקיקים חיוביים (איור 3). כך או כך, בקלות ניתן לגרום להופעה של זרם חשמלי: הן על-ידי זרימת אלקטרונים בפס ההולכה הכמעט ריק, והן על-ידי החורים ה"נעים" בפס הערכיות. כדי להבין בפשטות מדוע חור מוליך חשמל כאילו היה חלקיק אמיתי בעל מטען חיובי (ההפוך ממטען האלקטרון), אפשר להשוות אותו לחור הנוצר במשחק ה-15: הלוחיות עם המספרים אינן יכולות לזוז כל עוד אין לפחות "חור" אחד ריק (ראו איור 3).

רמות אנרגיה מסוימות. רמות האנרגיה במוצקים יוצרות רצף רמות ("פסים") המסוגלות לאכלס מספר מסוים של אלקטרונים; המצבים ה"אסורים" בין הפסים נקראים "פערי אנרגיה" (איור 2). הפס בעל האנרגיה הגבוהה ביותר המכיל אלקטרונים מכונה "פס הערכיות" (valence band), ואילו הפס הבא, שהוא ריק מאלקטרונים ובעל אנרגיה גבוהה יותר, מכונה "פס ההולכה" (conduction band). מוליכות חשמלית בחומרים קשורה לתנועת אלקטרונים בהשפעת מתח חשמלי, והיא מתרחשת בשתי דרכים המבדילות בין התנהגויות המוליכים, המבודדים והמוליכים-למחצה.

● כאשר פס ההולכה מלא באלקטרונים רק בחלקו, שדה חשמלי יכול להביא להגדלה רציפה של האנרגיה של אלקטרונים על-ידי העלאתם לרמות אנרגיה פנויות וגבוהות יותר. במצב זה ישנה זרימה של אלקטרונים כתגובה למתח חשמלי, והוא מאפיין מתכות מוליכות חשמל (איור 2). לעומת זאת, אם פס הערכיות מלא לגמרי, האלקטרונים אינם יכולים לנוע בתוכו בחופשיות בהשפעת שדה חשמלי, ואז אין מוליכות חשמלית והחומר מבודד (איור 2).



איור 2 | מבנה הפסים של חומר מוצק.
 (א) אם אין פער אנרגיה בין פס ההולכה לפס הערכיות, החומר מוליך.
 (ב) אם פער האנרגיה גדול, החומר מבודד. (ג) במצב ביניים, שבו יש פער קטן, החומר מוליך-למחצה.

1	2	3	4
8		5	12
6	7	11	13
9	10	15	14

ב

שבהן ניתן לייצר ולעבד פלסטיק לכל צורה אפשרית, על-ידי הזרקתו לתבניות בטמפרטורה גבוהה, טוויית חוטים וייצור יריעות דקות, נמצאו לפלסטיק אינספור שימושים בחיי היומיום ובתעשייה. אחד משימושי הנפוצים הוא כחומר בידוד המבטיח כי רשתות חשמל ומעגלים אלקטרוניים יפעלו כשורה בלא קצרים.

איך גורמים לפלסטיק להוליך חשמל?

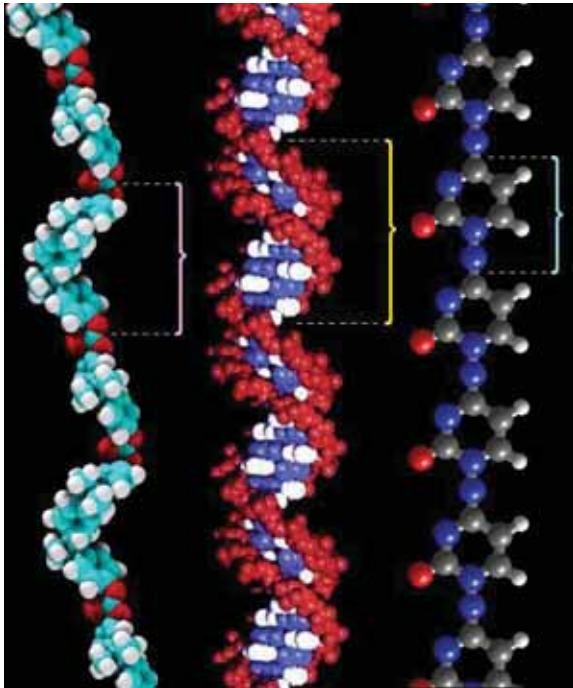
התפישה שלפיה חומרים פלסטיים הם מבודדים ושונים מהותית בתכונותיהם החשמליות ממתכות היתה שרירה וקיימת עד לגילוי המפתיע, לפני כ-30 שנה, של חומרים פלסטיים היכולים להוליך חשמל לא פחות טוב ממתכות. על מנת שפולימר יהפוך להיות מוליך, עליו לדמות תכונות של מתכת, כלומר, עליו להכיל כמויות גדולה של אלקטרונים חופשיים שאינם קשורים לאטומים. ואכן, בשנת 1977



איור 3 | (א) תהליך יצירת החור: האטום המסמם "חוטף" וקושר אליו אלקטרון מפס הערכיות, ובמקומו נשאר חור ה"נע" בפס הערכיות כאילו הוא חלקיק בעל מטען חיובי. (ב) משחק ה-15: המשחק מדמה את פס הערכיות הכמעט מלא לוחיות המספרים אינן יכולות לזוז כל עוד אין לפחות "חור" אחד. ריק, כיוון תנועת החור הפוך לכיוון תנועת הלוחיות

מהו פולימר הפלסטיק?

החומרים הפלסטיים הם חומרים מלאכותיים שרובם מופקים ממוצרי לוואי של התעשייה הפטרוכימית (התעשייה הכימית שחומר הגלם שלה הוא נפט). הפלסטיק בנוי ממולקולות ענק הקרויות פולימרים ומעוד מרכיבים אחדים, המוספים בהתאם לסוג הפלסטיק. כל פולימר הוא שרשרת ארוכה של יחידות בסיס (מונומרים), החוזרות על עצמן מאות ואף אלפי פעמים (איור 4). בתהליך הפלמור, כתוצאה משיתוף הדדי של אלקטרונים בין מונומרים שכנים, נוצרים ביניהם קשרים כימיים הקושרים אותם זה לזה ויוצרים שרשרת. פולימרים רבים, ובהם פוליאתילן, פוליסטירן, ניילון, PVC ואחרים, מבוססים על תהליכי פלמור מלאכותיים, אבל יש גם מגוון של פולימרים טבעיים מן החי והצומח. הפולימר הטבעי הידוע ביותר הוא מולקולת ה-DNA; גם רב-סוכרים (דוגמת עמילן) וחלבונים הם סוגים של ביו-פולימרים טבעיים. קורי עכביש, חוטי משי, פשתן, סיבי כותנה, צמר ושיער גם הם עשויים מפולימרים טבעיים. התכונות המועילות ביותר של חומרים פלסטיים הן חוזק, משקל סגולי נמוך, אדישות כימית ובידוד תרמי וחשמלי. ואכן, אחת המהפכות התעשייתיות החשובות של המאה ה-20 היתה "מהפכת הפלסטיק". הודות לקלות ולגמישות

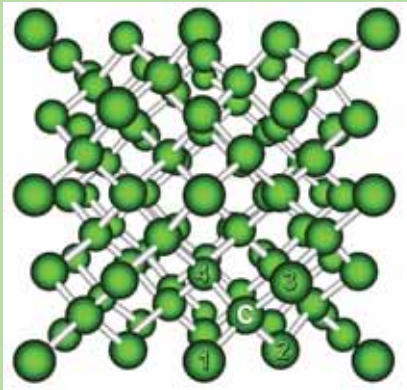


איור 4 | שלוש דוגמאות למולקולות פולימר ארוכות הצבעים השונים מציינים אטומים של יסודות שונים; יחידת המונומר החוזרת על עצמה מסומנת בסוגר. הפולימר האמצעי הוא מולקולת DNA

הפחמן לאורך שרשרת הפולימר, אנו מבחינים בין שני סוגי קשרים: קשרי סיגמא וקשרי פאי. קשרים אלה הם גם הבסיס להבנת מנגנון ההולכה בחומרים אורגניים ופולימרים המבוססים על היסוד פחמן (ראו תיבה משמאל). הפולימרים המוליכים מתאפיינים בסדרה של קשרים בודדים וכפולים לסירוגין, הנקראים "קשרים מצומדים" (Conjugated bonds) החוזרים על עצמם לאורך שרשרת הפולימר. לדוגמה, במולקולת הפוליאצטילן (Polyacetylene), אחד הפולימרים המוליכים הנפוצים, הקשר המצומד הוא בין אטומי הפחמן הבונים את שלד השרשרת (איור 7א). בפולימרים אחרים הקשרים המצומדים הם לרוב בתוך טבעות סגורות (איור 7ב). קשרי הסיגמא הם המחזיקים יחד את אטומי השרשרת, אבל אינם מאפשרים הולכה חשמלית בגלל הקרבה

← חוללו החוקרים האמריקנים אלן היגר (Heeger) ואלן מק-דיארמיד (MacDiarmid) והחוקר היפני הידקי שיראקאוה (Shirakawa) מהפכה של ממש, כאשר הצליחו ליצור פולימרים מוליכים או מוליכים-למחצה, באמצעות תהליך של סימום. על תגליתם החשובה הזאת זכו היגר, מק-דיארמיד ושיראקאוה בפרס נובל לכימיה לשנת 2000. חוט חשמל מתכתי מוליך זרם משום שאלקטרוני ההולכה חופשיים לנוע. על מנת להסביר כיצד פולימרים מצומדים שעברו תהליך סימום יכולים להוליך חשמל, עלינו להסביר ביתר פירוט את הקשרים הכימיים בין אטומי פחמן. אלו הם קשרים קוולנטיים הנוצרים על-ידי שיתוף של זוגות אלקטרוניים בין שני אטומי פחמן שכנים (להסבר מפורט יותר, ראו תיבה למטה). כאשר אנו מתארים את הקשרים הכימיים בין אטומי

קשרים כימיים קוולנטיים של פחמן: מבנה היהלום



איור 5 | מבנה גביש היהלום. כל אטום פחמן קשור בקשר קוולנטי לארבעת שכניו הקרובים על-ידי שיתוף של כל ארבעת האלקטרונים הפנויים שלו, אחד לכל קשר

כדי להבין את מנגנון ההולכה בחומרים אורגניים הבנויים על בסיס היסוד פחמן, יש לחזור לטבלה המחזורית. אטום הפחמן נמצא בעמודה הרביעית בטבלה, ומכאן נובע שלכל אטום יש ארבעה אלקטרונים פנויים היכולים להשתתף בקשרים כימיים בין אטומי הפחמן. בגביש היהלום (איור 5), שהוא אחת מצורות הפחמן הטהור בטבע, הקשר הכימי בין כל זוג אטומים שכנים הוא קשר קוולנטי ומשתתף בו זוג אלקטרונים (אלקטרון אחד מכל אטום). לכל אטום פחמן ביהלום יש ארבעה אטומים שכנים, ולכן בקשרים הקוולנטיים שנוצרים ביניהם משתתפים שמונה אלקטרונים בזוגות (ארבעה מכל אטום). מכיוון שכל האלקטרונים הפנויים משתתפים בבניית הקשר הקוולנטי ופס ההולכה שלו ריק, היהלום מבודד חשמלית בטמפרטורת החדר.

שתי הערות:

- מבנה הגביש של צורן וגרמניום זהה לזה של גביש היהלום, משום ששני יסודות אלו מצויים, כמו הפחמן, בעמודה הרביעית בטבלה המחזורית. מדוע, אם כן, צורן וגרמניום הם מוליכים-למחצה בעוד שיהלום הוא מבודד? הסיבה היא פשוטה: פער האנרגיה ביהלום גדול פי חמישה מזה של הצורן ופי שמונה מזה של הגרמניום, ולכן לאלקטרוני היהלום (בטמפרטורת החדר) אין אפשרות לקפוץ מפס הערכיות לתוך פס ההולכה.
- לפחמן יש עוד צורה נפוצה בטבע, השונה מאוד מגביש היהלום בכל תכונותיה. זהו גביש הגרפיט. בניגוד ליהלום, הגרפיט הוא מוצק רך ולא שקוף. ההבדל בין הגרפיט ליהלום נעוץ במארז שונה מאוד של אטומי הפחמן בשתי צורות הגביש, הגורם לצורה שונה של שיתוף מסילות האלקטרונים, וכך היהלום מבודד ואילו הגרפיט מוליך חשמל. למעשה, יש דמיון מסוים בין מבני הפסים של גרפיט והפולימרים המוליכים האורגניים שנתאר בהמשך. ■

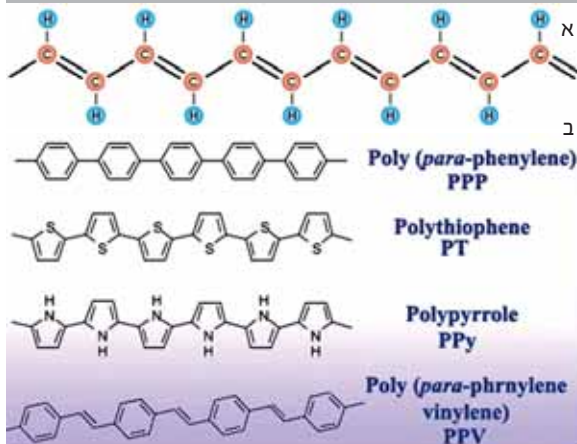
את מבנה הפסים של מתכות, מבודדים ומוליכים-למחצה (איור 2). השוני ביחס למתכות או צורן הוא שכאן התכונות האלקטרוניות קשורות לאבני בניין מולקולריות (שרשרות הפולימר), שאינן מאורגנות כגביש, להבדיל מאבני הבניין האטומיות של אטומי המתכת או הצורן המסודרים בסדר גבישי.

אבל כיצד יכולים אלקטרוני פאי המשתתפים בקשר הכפול לנוע? הרי בפולימר "נקי", בלא זיהומים, אין לאלקטרונים אלו מצבים פנויים שלתוכם הם יכולים לקפוץ. העיקרון הפועל בסימום מוליכים-למחצה מתקיים גם כאן: הכנסת אטומים מזהמים גורעת מקצת האלקטרונים שבפס הערכיות, וכך נוצרים בפס זה "חורים" בעלי מטען חיובי המשתתפים בהולכה החשמלית.

הולכת החשמל של פולימרים מצומדים כגון פוליאצטילן משתנה בתחום נרחב ביותר. בעוד שבמצבו הטבעי הפוליאצטילן הוא מוליך-למחצה, בעל מוליכות חשמלית נמוכה בטמפרטורת החדר, ניתן להגדיל את מוליכותו בסדרי גודל רבים (בתהליך הדומה לסימום של מוליכים-למחצה) ולהגיע למוליכויות המשתוות לאלו של מוליכים מעולים כגון נחושת וכסף. קיימות גם משפחה אחרת של פולימרים,

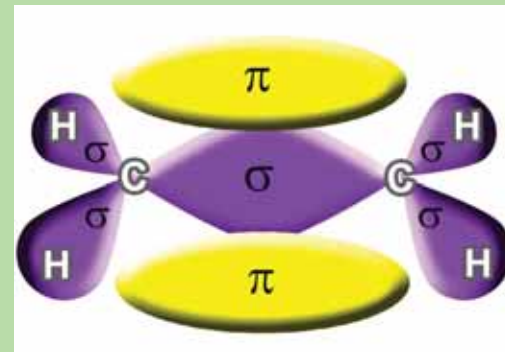


איור 7 | (א) מולקולת הענק של הפוליאצטילן נוצרת מפלמור של מונומרי אצטילן ויצירה של שרשרת ארוכה של אטומי פחמן (C) המחוברים ביניהם בקשרים מצומדים, כאשר לכל אטום פחמן מחובר אטום מימן אחד (H). (ב) דוגמאות נוספות לפולימרים מוליכים בעלי קשרים מצומדים. בנקודות החיבור בין הקשרים ישנם אטומי פחמן (C), שמקובל שלא לסמנם בפירוש, או לפי המסומן: אטומי חנקן (N), גפרית (S) וכו'.



קשרי σ - π בחומרים אורגניים

במולקולות אורגניות הבנויות על בסיס הפחמן יש שני סוגים של קשרים קוולנטיים, הנקראים קשרי סיגמא וקשרי פאי. באיור 6 ניתן לראות את שני סוגי הקשרים במולקולת האתילן - מולקולה אורגנית קטנה, הבנויה משני אטומי פחמן וארבעה אטומי מימן. הקשר המחבר את שני הפחמנים באתילן הוא קשר כפול המורכב משני קשרים: קשר סיגמא וקשר פאי. קשר סיגמא בין הפחמנים (וכן בין הפחמן למימן) נמצא במישור המחבר את האטומים השכנים. הקשר השני בין הפחמנים הוא קשר פאי. הוא נוצר בין מסלולי אלקטרונים הניצבים למישור של קשר סיגמא. כמו כן ניתן לראות שענן האלקטרונים בקשר פאי מרוחק יותר מאטומי הפחמן מאשר בקשר סיגמא, ולכן האלקטרונים קשורים לאטום הפחמן בקשר רופף יותר. ■



איור 6 | קשרים כימיים במולקולת האתילן: קשר סיגמא (בסגול) נמצא במישור המחבר בין אטומי פחמן (C) למימן (H) ומחבר בין אטומי פחמן ומימן ובין אטומי פחמן; וקשר פאי (בצהוב) מחבר בין אטומי פחמן במישור הניצב

הגדולה של ענן האלקטרונים לאטום הפחמן. קשרי הפאי, לעומתם, מאפשרים תנועת אלקטרונים (והולכה חשמלית) לאורך השרשרת ואפילו "קפיצה" של אלקטרונים בין שתי שרשרות קרובות. מנגנון ההולכה של אלקטרוני פאי מורכב גם כאן ישנן רמות אנרגיה מאוכלסות וריקות המזכירות



שהם מוליכים טובים גם כשהם במצב טהור, בלא זיהומים; פולימרים אלה נקראים "פולימרים מוליכים מטבעם" – ICP (Inherently Conducting Polymers). אלו הם פולימרים שמוליכותם נובעת מהמבנה המולקולרי של הפולימר, ומוליכותם נמצאת בתחום ההולכה, בין המוליכים-למחצה ועד למוליכים מתכתיים עם מוליכויות בתחום שבין 10^{-4} ל- 10^4 ביחידות של אחד חלקי אוהם-מטר.

שימושים בפולימרים מוליכים

ייתכן שהפלסטיק לא יוכל לעולם להתחרות במהירויות החישוב וביכולת המזעור של שבבי הצורן הנפוצים כיום בתעשיית המיקרו-אלקטרוניקה, ואולם, עקב מחירו הזול, תהליכי הייצור והעיבוד הפשוטים וגמישותו האלסטית, הוא יוכל להגיע למקומות שאליהם הצורן לא יגיע לעולם. את הסוגים השונים של פלסטיק מוליך חשמל אפשר לחלק לשתי קבוצות עיקריות. הקבוצה האחת כוללת פולימרים מוליכים (המדמים תכונות הולכה של מתכות רגילות), והאחרת פולימרים מוליכים-למחצה, שמהם אפשר לייצר דיודות פולטות אור, טרנזיסטורים, לוחות תצוגה ומעגלים משולבים. נסקור כאן בקצרה יישומים אחדים של שתי קבוצות אלו, ובהמשך המאמר נתמקד ביישומים של פולימרים מוליכים-למחצה בלבד. במאמר מוסגר נדגיש שאנו מתמקדים בפולימרים המאפשרים הולכת חשמל אלקטרונית; ישנם יישומים חשובים מאוד בסוללות ובתאי דלק, המבוססים על הולכה יונית של פולימרים. למשל, סוללות הפולי-ליתיום (Lithium Ion Polymer), שבהן הפולימר כשלעצמו אינו מוליך, אך הוא מכיל יונים רבים של ליתיום. חומרים אלו מרכיבים את הסוללות הנפוצות ביותר במצלמות דיגיטליות, בנגני MP3 ובטלפונים ניידים, אך הם מהווים משפחה שונה מאוד של חומרים פולימריים, ולא נדון בהם כאן.

כיישומים אפשריים לפולימרים מוליכים ומוליכים-למחצה אנו מונים תגיות זיהוי זולות המכילות שבבים מפלסטיק והפועלות באמצעות גלי רדיו; אמצעי אחסון פשוטים לנפח נתונים גדול; צגים ומרקעים זולים (אפילו חד-פעמיים, או כאלה שאפשר לכופף בקלות ולתלות כלוחות מודעות או פרסומות סביב עמודים עגולים); ואולי

אפילו פריטי לבוש המכילים בתוכם רכיבים אלקטרוניים גמישים. זאת ועוד, פולימרים רבים, דוגמת פוליאנילין, מופיעים במגוון רב של צבעים, בגלל דרגות החמצון השונות של היסודות המרכיבים אותם. חומרים אלו נקראים חומרים פוטו-כרומיים (או תרמו-כרומיים), משום ששינוי הצבע בהם מתרחש בעקבות שינוי בתנאי התאורה (או הטמפרטורה). היכולת של פלסטיק להוליך חשמל מאפשרת ייצור מעגלים משולבים של דיודות וטרנזיסטורים המתאפיינים ביתרונות של חומרים פלסטיים זולים וגמישים. בתעשיית האלקטרוניקה פולימרים מוליכים יכולים לשמש כדבק מוליך במעגלים חשמליים מודפסים וכחומרי אריזה המונעים היווצרות חשמל סטטי, העלול לפגוע במעגלים חשמליים עדינים. קיימים גם שימושים רבים שאינם קשורים במעגלים חשמליים, כמו ציפוי תחליבים של סרטי צילום למניעת היווצרות חשמל סטטי, הסתרת עצמים מפני גילוי מכ"מ (באמצעות ציפוי הבולע, ואינו מחזיר, את הגלים המיקרומטרים שמשדר מכשיר המכ"מ), ייצור עצבים ועוד. מלאכותיים ועוד.

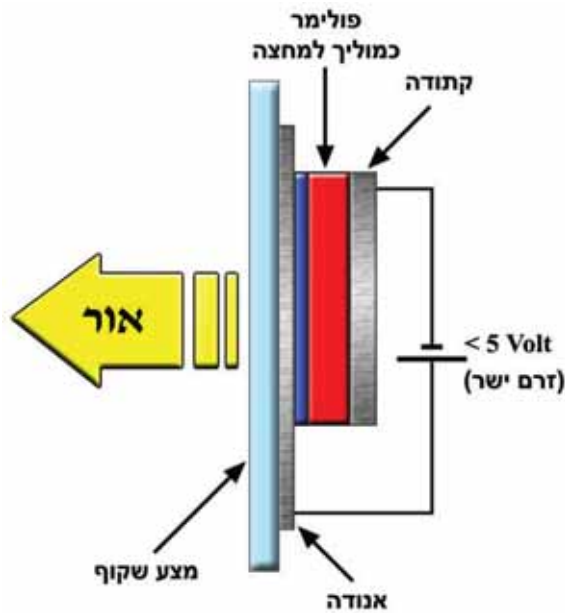
שימושים של פולימרים מוליכים-למחצה בתעשייה האלקטרו-אופטית

אחת התכונות הייחודיות של פולימרים כחומרים מוליכים-למחצה היא יכולתם לפלוט אור בתגובה על מתח חשמלי. תכונה זו, שהתגלתה לראשונה ב-1989, מאפשרת ליצור מגוון רחב של צגים חשמליים גמישים ומכשירים אופטיים שונים המבוססים על החומרים הפולימריים. לצגים אלה יתרונות רבים ביחס לצגים הרגילים המוכרים לנו, כפי שניווכח בהמשך.

דיודה פולימרית פולטת אור – PLED

הרבה מחקר ופיתוח הוקדשו ב-15 שנים האחרונות לסוג חדש של דיודה פולטת אור (Light Emitting Diode, LED) העשויה מחומר פולימרי, שממנה ניתן לבנות מסכים דקים יותר ממסכי ה-LCD הקיימים כיום. דיודה פולטת אור היא רכיב אלקטרוני הפועל כשסתום חד-כיווני. מתח חשמלי מאפשר מעבר זרם חשמלי בכיוון אחד בלבד, וכשהזרם זורם בכיוון זה ההתקן פולט אור. מכיוון שמסכים חדישים אלו,





איור 9 | מבנה ה-PLED: שכבה דקה של חומר פולימרי מוליך-למחצה ארוזה כסנדוויץ' בין שתי אלקטרודות - אנודה שקופה וקתודה מתכתית. בזמן הפעלת מתח חשמלי, הפולימר זוהר והאור נפלט דרך האנודה השקופה

אפקטים חזותיים מרהיבים.

טכנולוגיית ה-LED היא טכנולוגיה ותיקה, הקיימת מעל ל-50 שנה, וקשורה לתעשיית המוליכים-למחצה המבוססים על צורן (סיליקון). לפני כ-17 שנה פותחו באוניברסיטת קיימברידג' באנגליה דיודות LED מסוג שונה לחלוטין, המבוססות על פולימרים מוליכים-למחצה. דיודות אלה נקראות דיודות פולטות אור פולימריות, (Polymeric) PLED (Light Emitting Diodes). למעשה, כיום מפתחים סוגים שונים של דיודות פולטות אור המבוססות על מולקולות אורגניות והנקראות דיודות פולטות אור אורגניות, OLED (Organic LEDs). חלקן בנויות ממולקולות ארוכות (פולימרים) וחלקן ממולקולות קצרות. שתי טכנולוגיות אלה מתחרות זו בזו, ועדיין לא ברור מי מהן תוביל בעתיד.

במאמר זה נתמקד רק בדיודות פולטות אור פולימריות. הדיודה פולטת האור הפולימרית, PLED, היא התקן בעל מבנה של סנדוויץ': שכבה של חומר פולימרי בעובי קטן מ-100 ננומטר (ננומטר אחד הוא מיליארדית המטר), הממוקמת בין שתי אלקטרודות. אחת האלקטרודות (האנודה) דקה מאוד ומצפה את צדו הפנימי של משטח שקוף (למשל זכוכית), והאלקטרודה האחרת (הקתודה) עשויה ממתכת (איור 9). כאשר מופעל מתח בין שתי האלקטרודות, ה-PLED מתחילה לפלוט אור דרך האנודה.

העשויים מדיודות פולטות אור פולימריות, הם איכותיים, חסכוניים וגמישים יותר, יהיה אפשר להשתמש בהם כדפים אלקטרוניים, כמסכים לטלפון הנייד וכמסכי תצוגה שקופים-למחצה בתאי טייס.

כידוע, אם נעביר זרם חשמלי חזק די הצורך בחוט להט, החוט יתחמם מאוד ויקרין חום ואור - כך פועלת נורת ליבון רגילה. ב-LED, לעומת זאת, האור נפלט משכבה דקה העשויה חומר מוליך-למחצה בזמן שמופעל עליה שדה חשמלי נמוך, בלא צורך בחימום. עקרון זה נקרא אלקטרו-לומינסנציה (Electro-luminescence). לנורות ה-LED יתרונות רבים על פני נורת הליבון או הנורה הפלואורסצנטית: האור הנפלט הוא מונוכרומטי (עשוי אורך גל יחיד) במקורו, ולכן אין צורך במסננים נוספים על מנת לקבל אור בצבע מסוים. מאחר שהנורה מבוססת על התקן של מוליך-למחצה, דרוש מתח נמוך להפעלתה (פחות מ-4 וולט), התחממותה מועטה והזמן הדרוש להדלקתה קצר מאוד (מסדר גודל של מיקרו-שניות, לעומת עשירית השנייה בנורת ליבון וחצי שנייה לנורה פלואורסצנטית). אורך החיים של ה-LED הוא ארוך מאוד, והיא עמידה מכנית למכות וזעזועים. לנורות אלה שימושים מגוונים (איור 8). הן משמשות כנורות בקרה במכשור אלקטרוני, כנורות בשלט רחוק (כמו הנורה הקטנה בשלט טלוויזיה), כרמזורים, כפנסי מכוניות, כגלאי תזוזה (כמו בעכבר המחשב האופטי) ואפילו כנורות תאורה וליצירת



איור 8 | דוגמאות לשימושים בנורות LED: שלטים המציגים זמני הגעה של אוטובוסים, נורת הבקרה בשלט טלוויזיה, פנסי מכוניות, רמזורים ופנסי קטנים

הייצור פשוט וזול. כמו כן, מאחר שצבע האור הנפלט תלוי במבנה הכימי, אפשר "להנדס" את המולקולות לפלוט אור בצבעים שונים בקלות יחסית. זאת בניגוד ל-LED הרגיל המבוסס על גביש מוליך-למחצה – הרבה יותר קשה לגרום לגביש לפלוט אור באורך גל מסוים "לפי דרישה".

אנו נמצאים כעת בעיצומו של תהליך שבו נורות ה-LED מחליפות בהדרגה את מרבית מקורות האור המשמשים אותנו כיום (נורת ליבון, נורה פלואורסצנטית, נורת הלוגן וכו'). רבים מעריכים כי נורות ה-LED האורגניות ו/או מבוססות הפולימר יתפסו בעתיד הקרוב פלח שוק נכבד. אמנם, נורות אלה הן בעלות עוצמת הארה פחותה מזו של נורת הליבון או הנורה הפלואורסצנטית וקשה ליצור בעזרתן אור לבן, אך כבר עתה מסתמנים פתרונות טכנולוגיים למכשולים אלו, ושימושיהן יתרבו לא רק במכשירי האלקטרוניקה, אלא גם כאמצעי תאורה חלופיים.

צגים המבוססים על PLED

שימוש נוסף ל-PLED הוא בצגי טלוויזיה דקים, תמרורים ושולטים מאירים. מאחר שניתן בקלות ליצור שכבה דקה בעלת ממדים גדולים מפלסטיק, אפשר אפילו לדמיין טפטים פולטי אור בביתנו ויישומים מרהיבי עין אחרים. לצג ה-PLED יתרונות רבים על פני צגים הנמצאים בשימוש כיום. להבדיל מה-LCD, שהוא מסך של גביש נוזלי (Liquid Crystal Display), שבו מקורות אור נפרדים צריכים לעבור סינון בכמה שלבים על מנת לקבל פיקסל צבעוני המורכב משלושת צבעי היסוד: אדום, ירוק וכחול (RGB) (וראו: רומי שמאי ודוד אנדלמן, "מים, חשמל ומה שביניהם...", "גליליאו" 101) – הרי שבצגים המבוססים על פולימרים התמונה שאנו רואים אינה עוברת תהליכי סינון כאלה (משום שהפולימר יכול לפלוט אור מונוכרומטי "לפי דרישה"), והיא בהירה וברורה יותר. בצגי ה-LCD קיימת מגבלה של זווית הצפייה, ואילו בצגי ה-PLED אפשר להתבונן בזוויות קהות הקרובות ל-180 מעלות (איור 11). לצגים אלה מבנה פשוט ולכן עלותם נמוכה יותר. הם אינם כוללים הארת רקע ומקטבים כמו הצגים העכשוויים (העובי של צג ה-LCD, וכן 90% מהאנרגיה שהוא צורך, נובעים מהצורך להשתמש בתאורה אחורית) והם דקים יותר (עד עובי של דף נייר). גם מהירות התגובה שלהם גבוהה (זמן תגובתם לכיבוי והדלקה

העיקרון שבבסיס פעולתה של ה-PLED דומה לעקרון הפעולה של כל הדיודות פולטות האור: כל עוד מפעילים מתח בין שתי האלקטרודות, מטענים חשמליים "מוזרקים" לחומר הפולימרי בצורה מתמדת: אלקטרונים מאלקטרודה אחת, וחורים מהאחרת. האלקטרונים והחורים "לוכדים" אלה את אלה, כלומר – האלקטרון חוזר לפס הערכיות מרמת אנרגיה גבוהה יותר וממלא את החור, והתהליך חוזר על עצמו עם אלקטרונים וחורים חדשים. בתהליך זה משתחררת אנרגיה עודפת כאור (פוטונים). אורך הגל של האור הנפלט תלוי בפער האנרגיה שבין פס ההולכה ופס הערכיות של הפולימר שבו משתמשים (איור 10).

יתרונה העיקרי של הדיודה פולטת האור האורגנית, ובפרט של הדיודה פולטת האור הפולימרית, בהשוואה לדיודות פולטות האור האי-אורגניות (התקני מצב מוצק), הוא בכך שכל מולקולה כבר מתפקדת כ"דיודה טבעית". לא צריך לבנות את הדיודה מכמה חומרים שונים ולדאוג לכך שהמצע הגבישי ישמר את תכונות המוליך-למחצה שלו. מספיק להכניס שכבה דקה של חומר אורגני כסנדוויץ' בין שתי אלקטרודות על מנת שהוא יפלוט אור, ולכן תהליך



איור 10 | דוגמה לאור צבעוני הנפלט מפולימרים בתגובה להארתם באור לבן, בלא מקור חשמל. לכל פולימר הצבע האופייני לו התמונה לקוחה מאתר חברת Cambridge Display Technology (CDT)

זאת, טרנזיסטורים אורגניים ניתן לייצר בתהליכים מהירים וזולים יותר, שאינם דורשים תנאים כה מחמירים. לאחרונה ייצרו טרנזיסטורים אשר פועלים היטב גם כאשר מכופפים אותם. טכנולוגיות אלה מאפשרות יצירת רכיבים אלקטרוניים גמישים, כגון נייר אלקטרוני (איור 13) וחיישנים לאריוזות ולמוצרים גמישים. מצפים שבעתיד ניתן יהיה לייצר אף מכשירים אלקטרוניים מסובכים יותר, כמו מחשבים ניידים גמישים ומתקפלים!

צגי מחשב מודפסים

במדפסת הדומה למדפסת הזרקת הדיו הביתית אפשר "להדפיס" מעגלים חשמליים מבוססי פולימרים בתוך שעות אחדות. קבוצה ממרכז המחקר והפיתוח של חברת דו-פונט (du Pont) דיווחה בקיץ 2004 על הדפסה ראשונה



איור 11 | לוח בקרה קטן המשולב במעגל חשמלי ומכיל נוחות PLED נראה בזווית ראייה שונת

מהיר עד פי 100 משל LCD!). כמו כן, ה-PLED צורכת מעט אנרגיה, ואפשר לייצר צגים שיפעלו במתחים נמוכים. יתרון חשוב נוסף הוא, שכאשר מאירים על מסך זה במקור אור חיצוני, האור איננו מוחזר מהמסך, ואינו מפריע לצפייה כפי שקורה בצגי פלזמה ו-LCD.

כיום קיימים בתעשייה צגי PLED רבים (ו-LED אורגניים אחרים) המשמשים למטרות תצוגה מגוונות, כמו למשל צג נגן MP3 או צג טלוויזיה בגודל של שעון (איורים 12, א, ב). אף שרוב צגי ה-PLED הקיימים כיום הם צגים קטנים, יש כבר דגמים של צגי PLED בגודל של צגי טלוויזיה רגילים.

טרנזיסטורים אורגניים

הטרנזיסטור הוא רכיב המפתח בכל תעשיית האלקטרוניקה המודרנית, ומשמש למגוון רחב מאוד של מטרות. ניתן לומר שהוא סוג של מתג מתוחכם הנשלט חשמלית. הטרנזיסטור הנפוץ ביותר עשוי סיליקון, אבל בשנים האחרונות הצליחו לייצר טרנזיסטורים אורגניים העשויים מחומרים פולימריים.

היתרון הבולט של טרנזיסטורים אורגניים על פני אלה העשויים סיליקון הוא קלות הייצור שלהם. על מנת לבנות שבב סיליקון משוכלל צריך להשקיע מאמץ רב בתהליכים מסובכים ויקרים הנעשים בטמפרטורות גבוהות, בתנאי ואקום גבוה ובחדרים נקיים במיוחד מכל זיהומים. לעומת

ב

א



איור 12 | (א) מכשיר טלפון נייד בעל מסכה המתפקד כצג העשוי מ-PLED. (ב) צג טלוויזיה קטן העשוי PLED על גבי שעון

כזאת של פולימרים אלקטרו-אקטיביים (שתכונותיהם הפיזיקליות משתנות בהשפעת שדה חשמלי) יהיה אפשר לייצר צגי טלוויזיה בשלמותם, על כל המעגלים האלקטרוניים והפיקסלים שלהם.

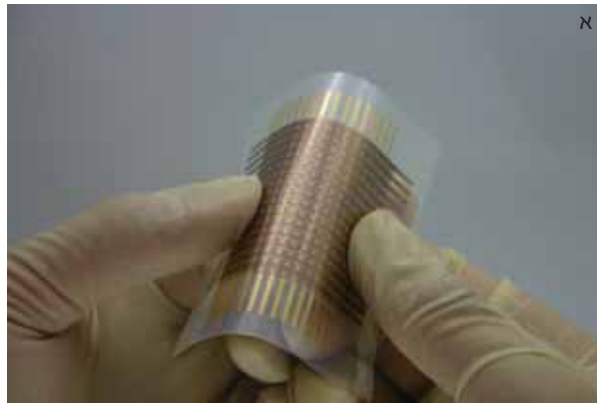
עור מלאכותי לרובוטים

בנובמבר 2003 הכריזו טאקאו סומייה (Someya) ועמיתיו מאוניברסיטת טוקיו על פיתוח יריעה גמישה, המכילה טרנזיסטורים של מולקולות קטנות יחסית של פֶּנטַאצֶן (Pentacene), כדי ליצור שכבת "עור" רגישה ללחץ, שתאפשר להעניק לרובוטים חוש מישוש. המרכיב הרגיש ללחץ של היריעה הוא שכבה של חומר מרוכב, עשוי גומי ופחמן (גומי הוא חומר פלסטי, שבו שרשרות הפולימר חוברו ביחד בכמה צמתים אך גמישותן נשתמרה) שהתנגדות החשמלית שלו תלויה במידת דחיסותו. חוש המישוש של הרובוט מבוסס על שינוי התנגדות היריעה במקום שבו נוגעים בה, כאשר את השינוי בהתנגדות מפעיל טרנזיסטור אורגני. הצוות ייצר יחידות שכל אחת מהן כללה מערך של 16X16 חיישנים, בגודל של 3 מילימטרים רבועים לכל חיישן, וטרנזיסטורים שהעבירו את האותות שהתקבלו משרות ועמודות החיישנים. כדי לכסות שטח רחב יותר קשרו את האלקטרודות החופפות באמצעות חיבור הקצוות שלהן והדבקתן באמצעות סרט הדבקה (איור 14א). כל המבנה



איור 13 | ספר אלקטרוני גמיש הבנוי מטרנזיסטורים אורגניים העשויים מחומר פולימרי
התמונה לקוחה מאתר חברת Plastic Logic

כזו על משטחים גדולים, באמצעות טכנולוגיה הקרויה הדפסה תרמית. בטכנולוגיה זו נעשה שימוש בקרן לייזר המתיכה את הפולימר ומקבעת אותו בתוך מצע, בדומה לתהליך של גיהוץ. בעתיד צופים כי באמצעות התכה



איור 14 (א) יריעה גמישה המכילה טרנזיסטורים של פנטאצן, שמועדה ליצור שכבת "עור" רגישה ללחץ. בשכבת עור זו עוטפים את הרובוט, והדבר מאפשר להעניק לו יכולת מישוש. (ב) היריעה הגמישה מלופפת סביב יד של רובוט ומעניקה לו יכולת לחוש לחץ מאתר אוניברסיטת טוקיו, יפן

עולם הטכנולוגיה בכל הרמות, החל מהמולקולה הבודדת וכלה בשבב המחשב. וכך אולי פלסטיק מוליך חשמל יוליך אותנו לאפשרות של חיבור יעיל יותר בין רקמות חיות ל"רקמות" חלופיות מלאכותיות. ■

המחברים מודים לאלי איזנברג, מיכל אנדלמן, יורם בורק, רועי בק-ברקאי, משה גוטליב, אור גראור, יורם דגן, דן דוידוב, גלעד הרן, רשף טנא, אנוק יוסבשילי, אולגה מחטי, אברהם ניצן, יוסי פלטיאל, ג'ודי קופרמן, יצחק רבין ורומי שמאי על הערותיהם המועילות.

מריאנה קורד'וב מסיימת בימים אלה תואר ראשון בפיזיקה באוניברסיטת תל-אביב.

לד"ר רפי שיקלר תואר דוקטור בהנדסת אלקטרוניקה מאוניברסיטת תל-אביב והוא השתלם לאחרונה בנושא המוליכים-למחצה האורגניים במעבדת קאוונדיש באוניברסיטת קיימברידג'.

פרופ' דוד אנדלמן נמנה עם אנשי הסגל של בית-הספר לפיזיקה ואסטרונומיה באוניברסיטת תל-אביב, והוא חוקר תכנות של חומרים מרוכבים בעלי יישומים ביולוגיים והנדסיים.

עשוי מפולימרים ומשכבה של פנטאצן, מלבד אלקטרודות זהב וציפוי נחושת שמוצמד לשכבה המרוכבת של גומי-פחמן. אפשר לגלגל את היריעה עד לקוטר של סנטימטר, קוטר קטן דיו להקיף אצבע דקה. יריעה זו הצליחו ללפף סביב יד של רובוט (איור 14 ב) ולדגום את האותות שהוא קולט כאשר מפעילים עליו לחץ מקומי. הרובוטים השכיחים ביותר כיום הם רובוטים לא-מתוחכמים הפועלים כמכסחות דשא ושואבי אבק, או בפסי הייצור בתעשייה. הציפייה היא שלצד רובוטים אלו ייכנסו לשימוש רובוטים והתקנים בעלי בינה מלאכותית, שיכללו שפע של צגים וחיישנים.

מילות סיכום

הפיתוח של התקנים ומכשירים המבוססים על חומרי פלסטיק מוליכים נמצא רק בראשית דרכו. הציפייה היא שחומרים אלו יחליפו בהדרגה סיליקון ומתכות בשימושים מסוימים. הפלסטיק המוליך מאגד בתוכו תכונות של חומרים אי-אורגניים (מתכות ומוליכים-למחצה) ושל חומרים אורגניים (דוגמת פולימרים וחומרים ביולוגיים). ייתכן שבעתיד יהיו לחומרים אלו שימושים רבים במערכות היברידיות (בנות-כלאיים), שיחברו בין עולם החי, החל ברמה המולקולרית וכלה ברמת האורגניזם השלם, לבין

ביום ה' 24.1.08, בשעות 19:00-22:00, יתארח פרופ' דוד אנדלמן בפורום "גליליאו" וישמח לענות על שאלותיכם. המעוניינים מוזמנים לפורום מדע וחברה באתר "גליליאו": www.ifeel.co.il/galileo

לקריאה נוספת

אתר פרס נובל בכימיה לשנת 2000: על גילוי ושימושי הפולימרים המוליכים
http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000

אתר הבית של חברת Cambridge Display Technology, המתמחה בשימושי ה-PLED
<http://www.cdtltd.co.uk>

אתר הבית של חברת Plastic Logic, המתמחה בבניית צגים גמישים
<http://www.plasticlogic.com>

אתר הבית של חברת PolymerVision, המייצרת צגים גמישים מחומרים פלסטיים
<http://www.polymervision.com>

S. R. Forrest, "The Path to Ubiquitous and Low-cost Organic Electronic Appliances on Plastic", *Nature* vol. 428, (2004), p. 911-918.

G. Malliaras and R. Friend, "An Organic Electronics Primer", *Physics Today* vol. 58, May 2005, p. 53-58.

C. Pratt, "Applications of Conducting Polymers", <http://homepage.ntlworld.com/colin.pratt/applcp.htm>