

פולימרים מוליכים

ח'אלד מסאלחה* ויעל שורץ**

מבוא

מאז ומעולם נהגו העוסקים במדע הכימיה ובהוראת הכימיה בבי"ס התיכון למיין חומרים לפי קבוצות ותכונות. את ההסבר לתכונות ברמה המיקרוסקופית אנו נותנים בהתבסס על מודלים כמו מודל הסריג המתכתי או היוני. הקבוצות שאליהן אנו מתייחסים בהוראה בבית הספר התיכון הן: מתכות, חומרים מולקולריים, חומרים יוניים וחומרים אטומריים. כדוגמה לתכונה משותפת ואופיינית למתכות אנו נותנים את ההולכה החשמלית הטובה במצב המוצק והנוזלי ומסבירים זאת בקיומם של אלקטרונים ניידיים. לעומת המתכות, החומרים המולקולריים אינם מוליכים חשמל במצב המוצק והנוזלי. ההסבר המקובל ברמת ביה"ס התיכון הוא כי הם בנויים ממולקולות ניטרליות שבהן אין חלקיקים טעונים ניידיים.

בבואנו ללמד את פרק הפולימרים, אנו מתארים אותם כחומרים הבנויים ממולקולות ענק. משמע, הם משויכים לקבוצת החומרים המולקולריים, ולפיכך אין הם צפויים להוליך חשמל במצב המוצק או הנוזלי.

תוקפה של ההכללה הרשומה מעלה מופר כשאנו מתייחסים לפולימרים בעלי שרשרות שמכילות מערכת של קשרים כפולים מצומדים, כי אלה עשויים להוליך חשמל בתנאים מסוימים.

בכתבה זו מובאת סקירה בסיסית אודות הפולימרים המוליכים: היסטוריה, מבנה, סינתזה, תכונות ההולכה ושימושים.

מבט היסטורי

העשורים האחרונים התאפיינו בהתעניינות גוברת בשתי קבוצות של חומרים: פולימרים אורגניים ומוליכים למחצה אנאורגניים. תודות למשקלם הקל של הפולימרים האורגניים¹, לקלות עיבודם ולעמידותם בפני קורוזיה החליפו פולימרים אלה מתכות ביישומים רבים או שימשו לייצור חומרים מקוריים (Roncali, 1992). כדאי לציין שלעיתים תוחלת חיים של מוליכים אורגניים נמוכה הרבה יותר מזו של מתכות, אך יתרונם של המוליכים הוא במחירם הזול. היום קיימים יישומים שבהם חומרים אורגניים אלקטרוניים מחליפים את החומרים האנאורגניים הודות לשיטות ייצור פשוטות וזולות יותר. לדוגמה, מסכי טלפונים סולאריים שאינם דורשים זרמים גבוהים ואורך חיים ממושך.

בתנאים רגילים הפולימרים - כלומר, חומרי פלסטיק - הם הפוכים בתכונותיהם מן המתכות. הם מבודדים ואינם מוליכים חשמל. תיל אלקטרוני מצופה בפולימרים על מנת ליצור בידוד ולהגן עליו ועלינו מפני מעגלים קצרים.

Hideki Shirakawa - I Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid שינו גישה זו כאשר גילו שהפולימר פוליאצטילן יכול להפוך למוליך למחצה ואף למוליך כמעט כמו מתכת (Bengt & Krutmeijer, 2000).

למוליכים למחצה האנאורגניים (כגון: צורן או גליום-ארסניד) השפעה משמעותית על חיי היום יום (שימושים כמו מעכבי

* ח'אלד מסאלחה הוא תלמיד לתואר שני בתכנית רוטשילד - ויצמן במכון ויצמן. כתבה זו נכתבה במסגרת עבודת הגמר בהנחיית ד"ר יעל שורץ

**ד"ר יעל שורץ, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן

1 מדובר הן במשקל נמוך באופן אבסולוטי (נובע מהעובדה שניתן ליצור שכבות דקות הרבה יותר - כ-100 ננו-מטר - מאשר במתכות) והן במשקל הסגולי: משקלם הסגולי של הפולימרים הוא 1-2 גר/מל, ומשקלה סגולי של מתכת יכול להגיע לכ-10 גר/מל.

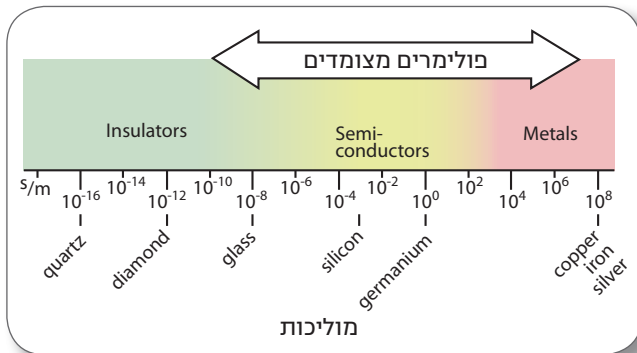
כאשר: U מסמל את מפל הפוטנציאל (וולטים), I מסמל את הזרם (אמפר), A שזורם בתוך נגד.

התנגדות של חומר ניתנת לחישוב מהביטוי $R = \rho l / A$:

ρ : התנגדות סגולית של הגוף, l : אורך הגוף (מטר), m : שטח החתך (מטר²).

σ , הערך ההופכי של התנגדות הסגולית נקרא מוליכות S/m ($S \equiv \text{Siemens} = \Omega^{-1}$) והיא תלויה במספר נשאי המטען - האלקטרונים, n , ובמובילות שלהם, μ , כלומר, כמה מהר הם יכולים לנוע בתוך החומר: $\sigma = n \mu e$ כש- e הוא מטען האלקטרון.

באיור 1 מוצגת המוליכות של חומרים שונים החל במבודדים כמו קוורץ ויהלום, דרך צורן וגרמניום שהם מוליכים למחצה, וכלה במתכות המוליכות. ניתן להבחין שהפולימרים המצומדים משתרעים מבחינת המוליכות שלהם על פני טווח גדול של ערכים, מהנמוכים (מבודדים) עד הגבוהים כמו מתכות.



איור 1: המוליכות של פולימרים מוליכים בהשוואה לחומרים אחרים, החל בקווארץ (מבודד) וכלה בנחושת (מוליך). המוליכות של הפולימרים המצומדים יכולה להשתוות לזו של המתכות. (Bengt & Krutmeijer, 2000)

הולכת המתכות מוסברת בקיומם של אלקטרונים ניידיים בסריג המתכתי. צפיפות גבוהה של רמות אנרגיה עם אלקטרונים בעלי אנרגיית קישור נמוכה יחסית. חפיפת האורביטלים של אטומי המתכת בסריג יוצרת פס רציף של אורביטלים קושרים שמאוכלס חלקית באלקטרונים, פס הערכיות ופס דבוק של אורביטלים אנטי קושרים, קרי, פס ההולכה.

קורוזיה, קבלים קומפקטיים, ציפויים אנטיסטטיים, טרנזיסטורים, תאורת לד ועוד ועל התפתחותם של תחומים רבים במדע וטכנולוגיה מודרניים, בייחוד על התפתחות האלקטרוניקה. בהקשר זה אין זה מפתיע שחומרים שמסוגלים לגלות בו-זמנית תכונות של פולימרים אורגניים ושל מוליכים למחצה מעוררים התעניינות רבה בקרב חוקרים באקדמיה ובתעשייה וזאת בתחומים שונים כמו כימיה, פיזיקה של המצב המוצק ואלקטרוכימיה.

פוליאצטילן סונתז בתחילה כאבקה שחורה, אך ב-1974 סנתז Shirakawa ושותפיו פס כסוף של פוליאצטילן מאצטילן בעודם משתמשים בזרזי Ziegler-Natta (Ziegler & G. Natta, 1966). למרות המראה המתכתי של הסרט, הוא לא הולך חשמל. ב-1977 גילו Shirakawa, MacDiarmid ו-Heeger שחמצון סרט הפוליאצטילן בכלור, ברום או קיטור של יוד גורם להעלאת המוליכות שלו בשנים-עשר (12) סדרי גודל!! (Shirakawa, Louis, Macdiarmid, Chiang, & Heeger, 1977). הטיפול בהלוגן נקרא הסממה או אילוח - doping, באנלוגיה לדופינג אשר אחראים להולכה החשמלית במוליכים למחצה³. המוליכות של הצורה המוסממת של פוליאצטילן ששווה ל- $10^5 S/m$ (סימנס למטר), גבוהה מכל פולימר שהתגלה לפניו (Bengt & Krutmeijer, 2000).

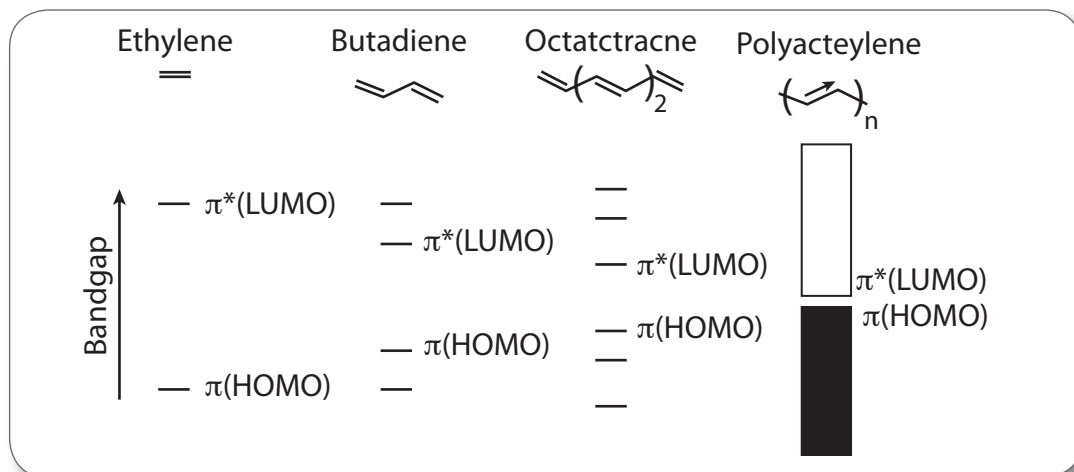
ראוי לציין שכבר בשנת 1862 H. Lethby חמצן אנילין בתוך חומצה גפרתית מרוכזת וקיבל חומר מוליך באופן חלקי, ככל הנראה פוליאנילין. בשנות ה-70 המוקדמות של המאה העשרים, הפולימר האנאורגני הנפיץ פולי (סולפוניטריד), $x(SN)$, התגלה כמוליך-על בטמפרטורות נמוכות (0.26K) (Bengt & Krutmeijer, 2000).

הולכה ומוליכות חשמלית

ההולכה החשמלית מוגדרת על פי חוק אוהם כערך ההופכי של ההתנגדות, R .

ההתנגדות (אוהם, Ω) ניתנת לחישוב מהביטוי: $U = I R$

³ סימום (Doping) של מוליכים-למחצה: החדרת כמות קטנה של אטומים מזהמים מיוחדים לחומר. האטומים המזהמים תורמים בקלות אלקטרונים לפס ההולכה או גורעים מקצת האלקטרונים שבפס הערכיות ויוצרים "חורים" שמתנהגים כאילו היו חלקיקים חיוביים. כך או כך, ניתן בקלות לגרום להופעה של זרם חשמלי: הן על-ידי זרימת אלקטרונים בפס ההולכה הכמעט ריק, והן על-ידי החורים ה"נעים" בפס הערכיות. <http://stwww.weizmann.ac.il/ptc/Tehuda/27-1/3-13.pdf>



איור 4: פס הפער, Bandgap, בין אורביטלי ה-HOMO לאורביטלי ה-LUMO הולך וקטן עם התארכות השרשרת המצומדת. (באדיבות ד"ר מיכאל בנדיקוב, מכון ויצמן למדע, רחובות)

ההסממה וצמיחת רמות ביניים

מנגנון ההסממה מוסבר ע"י יצירת מצבי (רמות) אנרגיה מאותרים בתוך פס הפער, מעין רמות ביניים שאלהן יכולים האלקטרונים לקפוץ בעירור תרמי, כמוצג באיור 5. (Bengt & Krutmeijer, 2000)

החומר המסממים מסלק או מוסיף אלקטרונים. יוד (I_2) למשל, גורע אלקטרון והופך ל (I_3^-). בעזרת ההסממה (אילוח) ניתן להכניס אלקטרון נוסף למערכת או (כפי שקורה ברוב הפולימרים המוליכים) להוציא אלקטרון מהמערכת ולייצר מטען חיובי (חור). במושגים כימיים תהליכי אילוח הם בעצם חמצון או חיזור. המטען הנוצר הוא במצב של אל איתור לא מלא, הוא נוצר על מספר קשרים הקרובים בקרבת יון של סימון, וכתוצאה מכך בקשרים האלו מתרחש גם שינוי גאומטרי. מצב זה מכונה פולארון, והוא שונה מקטיון רדיקלי. בגלל שמספר הקשרים שמשתתפים בכל פולארון הוא מוגבל, כדי לאפשר תנועה למטען לאורך השרשרת נדרש ריכוז גבוה יחסית של יוני סימון כדי לייצר כמות גדולה של פולארונים. בנוסף יכול להיווצר פולארון נוסף ובלתי תלוי או - אם האלקטרון הבלתי מזווג הוא זה שיוצא - ביפולירון בעל ספין אפס וששני מטעני החיוביים נעים כזוג. ראו איור 6.

בקישור זה מובאת אנימציה שמציגה שני פולארונים שנוצרים ע"י חמצון במולקולות יוד, נדידת ספין והיווצרות שני קרבוקטיונים ונדידת המטענים החיוביים לאורך השרשרת כשזו נתונה להשפעת שדה חשמלי. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/popular.html

יכולים לעבור מאורביטלי ה-HOMO לאורביטלי ה-LUMO שמהווים מעין פס הולכה.

הגרפיט הוא מוליך, אף שאינו בנוי משרשרות ליניאריות אלא משכבות דו-ממדיות שביניהן אורביטלי π חופפים, ובכל שכבה יש מספר גדול מאוד של אטומים (N גדול מאוד). לא כן הפולימר המצומד.

הוכח ניסיונית שפס הפער קשור לאורך הגל של פס הבליעה הראשון בספקטרום האלקטרוני של החומר כי פוטון בעל אורך גל יכול לעורר אלקטרון מ-HOMO ל-LUMO ואז:

$$\Delta E = E_{(LUMO)} - E_{(HOMO)} = h\nu = hc / \lambda$$

h: קבוע פלנק, ν : תדירות האור, c: מהירות האור.

בפולימרים λ גדל עם העלייה באורך השרשרת כי כאמור, ΔE קטן כשמתווספים קשרים כפולים ליצירת מולקולות עם צימודים מוארכים, בהתקדמות מאתן לבוטיאן להקסהטריאן וכו'. מעשית, הירידה בפער אינה כמוצופה מהמשוואה, ונראה שישנו גבול עליון שלאחריו אין שינוי בפער כתוצאה מהתארכות נוספת של הצימוד בפולימן ליניארי. ההסבר לכך קשור במה שנקרא עיוות Peirls שבו אורכי הקשרים במערכת המצומדת אינם שווים. למעשה, כל קשר שני הוא בעל אופי של קשר כפול (Bengt & Krutmeijer, 2000), ודבר זה גורם להגדלת הפער בין אורביטלי ההומו ללומו. עם פס פער משמעותי ואורביטלי ערכיות מלאים, לפולימריטילן מוליכות נמוכה בטמפרטורת החדר.

ההולכה הנפחית בחומר פולימרי מוגבלת בצורך שהאלקטרונים יקפצו משרשרת אחת לשרשרת העוקבת, כלומר, במונחים מולקולריים: גאקציית מעבר מטען אינטרמולקולרי. קיימת הגבלה נוספת של גורמים מקרוסקופיים כמו מגעים לא טובים בין מתחמים גבישיים שונים בחומר (זאת למרות שרוב הפולימר הוא אמורפי). מוליכות הפולימר היא אניזטרופית, ולפיכך היא גבוהה יותר לאורך כיוון השרשרות. במונח תכונה אניזטרופית אנו מתכוונים לתכונה שאינה זהה בכל הכיוונים של החומר.

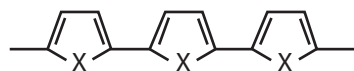
פוליאצטילן ופוליטיופן

פוליאצטילן, $(CH)_x$, איור 7 להלן, הוא המודל הפשוט ביותר מקבוצה זאת של חומרים. למרות אי יציבותם של חומרים אלה בסביבה הרגילה, ואף שאי יציבות זו מהווה מכשול עיקרי בפני יישומים פרקטיים, עדיין הפוליאצטילן נשאר אב הטיפוס של פולימרים מוליכים, והוא עדיין משמש נושא לעבודה תאורטית וניסויית רבה.

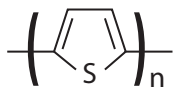
מודל נוסף של פולימרים מוליכים מוצג כפוליהטרו (טבעות)-איור 8 להלן - שניתנים לתיאור כשרשרת פחמנית sp^2p_x שהמבנה בה הוא אנלוגי לזה של ציס $(CH)_x$, והוא מיוצג ע"י ההטרו אטום. (Roncali, 1992).



איור 7: פוליאצטילן $(CH)_x$

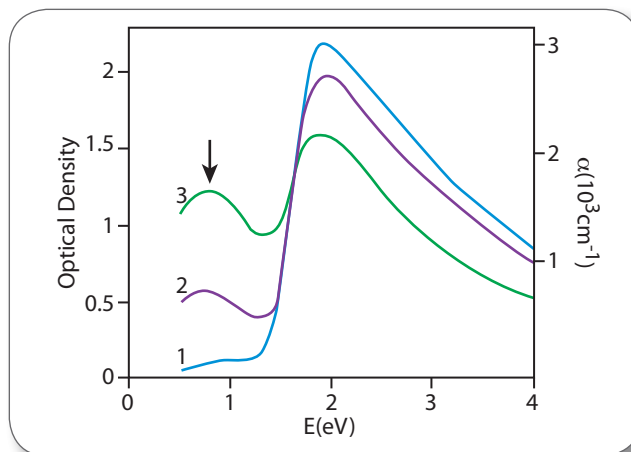


איור 8: פוליהיטרוטבעת

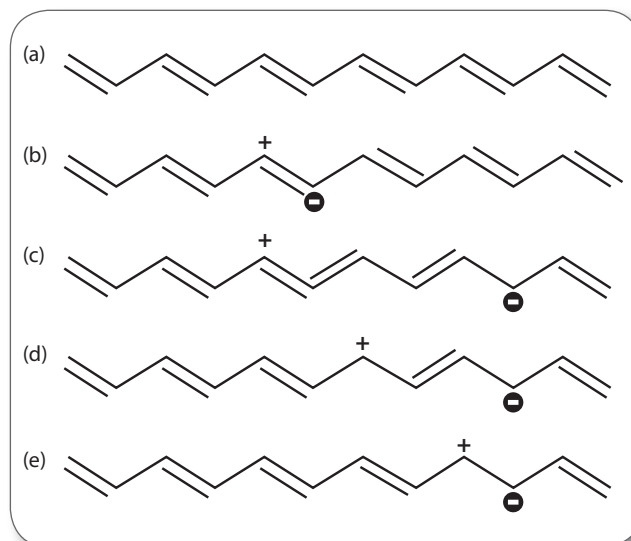


איור 9: פוליטיופן

פולימרים אלה מתאפיינים ביציבות בתנאי הסביבה הרגילים וברב-צדדיות שלהם המבנית שמאפשרת מודולציה של תכונותיהם האלקטרוניות והאלקטרוכימיות ע"י מניפולציה של מבנה המונומר (Roncali, 1992). הנציג הבולט של פולימרים אלה הוא הפוליטיופן שבו גפרית היא ההטרו אטום כפי שניתן לראות באיור 9.



איור 5: הבליעה האופטית של פוליאצטילן לא מוסמם (עקומה 1). כמו מוליך למחצה קלסי, הדוגמית שקופה לפוטון אור בעל אנרגיה קטנה מפס הפער 1.7 eV. (עקומות 2 ו-3) מראות את הבליעה של פוליאצטילן עם כמות מסמית הולכת וגדלה. ניתן להבחין בהופעת מצב midgap (החץ ב- 0.7 eV) עם ההסממה ושעקומות הבליעה נפגשות בנקודת שוויון, מאחר שמצבי midgap צומחים על חשבונם של המצבים האחרים.



איור 6: קטיון רדיקלי ("פולארון") שנוצר ע"י סילוק אלקטרון אחד מאטום הפחמן החמישי שבשרשרת אונדיקאהקסאן ($a \rightarrow b$). נדידת הפולארון מוצגת ב- $c \rightarrow e$. (Bengt & Krutmeijer, 2000)

סינתזה ועיבוד

Natta ושותפיו הכינו פוליאצטילן כבר בשנת 1958 ע"י פולימריזציה של אצטילן בתוך הקסאן ושימוש ב- $\text{Et}_3\text{Al/Ti}(\text{OPr})_4$ (Et= ethyl, Pr=propyl) כקטליזטור. אף על פי שהתקבלה אבקה בעלת גבישיות גבוהה, החומר היה שחור, רגיש לאוויר, קשה להתיתוך ובלתי מסיס. הפולימריזציה של Ziegler-Natta פותחה עבור הפולימריזציה של אלקנים כמו גם של אצטילן ע"י הכנסת מולקולה בלתי רוויה לתוך הקשר פחמן-טיטניום של המקרומולקולה הצומחת. בשנות ה-70 Shirakawa ושותפיו התאימו את השיטה להכנת סרטי פוליאצטילן מוגדרים היטב. הגילוי העיקרי של Shirakawa היה שפולימריזציה זו יכולה להתבצע על פני השטח של תמיסה מרוכזת של מערכת הקטליזה בתוך ממס אינרטי. בתהליך שנעשה בטמפרטורת החדר ואח"כ בקירור ל- -78°C ושבו שימש טולואן כממס, נוצר סרט של פוליאצטילן בצבע נחושת, ש-95% אחוז ממנו היה בהתארגנות הגאומטרית ציס. תהליך Shirakawa אפשר גם קבלת פוליאצטילן שכולו טרנס שנוצר ע"י הרצת התגובה ב- n-hexadecane ב- 150°C . בכל אופן המוליכות הייתה נמוכה יחסית: 10^{-7} - 10^{-8} עבור ציס-פוליאצטילן 10^{-2} - 10^{-3} S/m עבור איזומר הטרנס (Bengt & Krutmeijer, 2000).

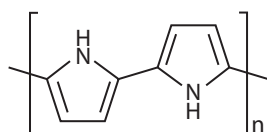
Shirakawa ועמו Ikeda כבר הבחינו שהטיפול בסרטי הפוליאצטילן הכסופים באמצעות ברום או כלור גרם לירידה בהעברה באינפרא אדום ללא שינוי בצבע, משמע שהפרש

האנרגיה בין ה- HOMO ל-LUMO קטן (יותר בליעה באינפרא אדום) בעקבות התגובה. במקביל נמדדה במעבדתו של Heeger מוליכות של 3000 S/m עבור טרנס-פוליאצטילן שטופל בIOD, עלייה של שבעה סדרי גודל לעומת החומר הבלתי מוסמם. בעקבות כך היה ניתן לשלוט ביחס ציס/טרנס, והסממת הציס-פוליאצטילן בIOD נתנה מוליכות גבוהה אף יותר. ייתכן שהIOD גרם תחילה לאיזומריזציה של הפולימר לכל טרנס-פוליאצטילן שעבר לאחר מכן הסממה יעילה (חסרת-פגמים), כך שדרגת האוריינטציה בפוליאצטילן המוסמם הייתה גבוהה יותר. הסממת ציס-פוליאצטילן ב- AsF_5 גרמה לעלייה במוליכות בפקטור של 10^{11} . המוליכות הגבוהה פתחה את התחום של "אלקטרוניקה של פלסטיק" (Bengt & Krutmeijer, 2000).

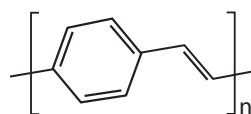
פולימרים אחרים נחקרו כבר בשנות ה-80 המוקדמות וביניהם פוליפירול, פוליתיופן (ונגזרות מגוונות של פוליתיופנים), פוליפנילנונילן ופוליאנילין:

פוליאצטילן נשאר הפולימר הגבישי המוליך העיקרי, אך אין הוא הפולימר המוליך הראשון שמוסחר, וזאת כי הוא מתחמצן בקלות בחמצן האוויר, ובנוסף - הוא רגיש ללחות. פוליפירול ופוליתיופן נבדלים מפוליאצטילן בעיקר בכך שהם ניתנים לסינתז ישירות במצב המוסמם והם יציבים למדי באוויר. המוליכות שלהם אינה גבוהה במיוחד, 10^4 S/m , אך היא מספיקה למספר רב של מטרות פרקטיות (Bengt & Krutmeijer, 2000).

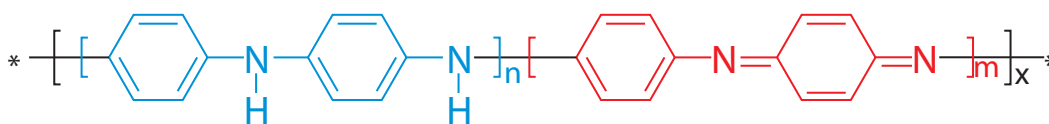
ההסממה ההלוגנית שהופכת את הפוליאצטילן למוליך חשמל טוב היא חמצון (או הסממת p). הסממה מוזכרת (שנקראת



פוליפירול (Polypyrrole)



פוליפנילנונילן (Polyphenylene vinylene)

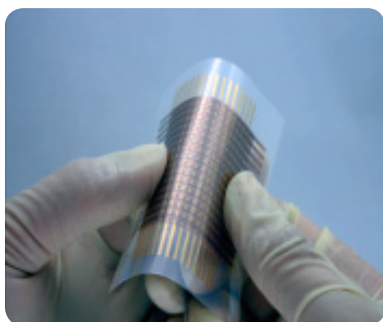


פוליאנילין (Polyaniline)

איור 10: נוסחאות של פולימרים מוליכים. הנוסחאות לקוחות מ-[http://en.wikipedia.org/wiki/Poly\(p-phenylene_vinylene\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Poly(p-phenylene_vinylene))



איור 11: ספר אלקטרוני גמיש הבנוי מטרנזיסטורים אורגניים העשויים מחומר פולימרי. התמונה לקוחה מאתר חברת Plastic Logic.



א) יריעה גמישה המכילה טרנזיסטורים של פֶּנטאצֶן, שנועדה 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)

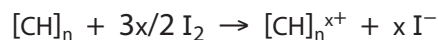
איור 12: יישומים של פולימרים מוליכים

אפקט-שדה [טרנזיסטור-מתג אלקטרוני- שהפעלת מתח (שדה חשמלי) מאפשרת זרימת זרם דרכו]: משתמשים בהן בקופות בסופרמרקטים.

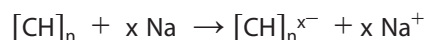
פולי (את'ילנידיאוקסיתיופן), [PEDOT], מוסמם עם פוליסטרן

הסממת n) אפשרית גם היא, למשל, באמצעות מתכת אלקלית:

הסממה מחמצנת:



הסממה מחזרת:



ע"י הפעלת שדה חשמלי מאונך לסרט יכולים היונים המנוגדים לפעפע מתוך המבנה או לתוכו. ג'אקציית ההסממה נמשכת אחורה או קדימה ובכך המוליכות יכולה להיות ממותגת: פתוח (on), סגור (off).

ישומים: אלקטרוניקה של פלסטיק

היתרונות בשימוש בפולימרים אורגניים ביישומים השונים הם: משקל סגולי נמוך, עיבוד קל, עמידות בפני קורוזיה וייצור זול (Bengt & Krutmeijer, 2000).

בין היישומים המלהיבים של פולימרים מוליכים ניתן למנות את הטרנזיסטורים האורגניים, צגי מחשב מודפסים, עור מלאכותי להענקת יכולת חישה לרובוטים ועוד....

פוליאנילין מוסמם: מוליך עבור סיכוך אלקטרומגנטי של מעגלים אלקטרוניים. הוא מיוצר גם כמעכב קורוזיה. נגזרות של פולי (פניל וינילידין) הפכו למועמדות העיקריות עבור השכבה הפעילה בייצור פיילוט של תצוגות אלקטרולומינסציות המשמשות לצגים של טלפונים ניידים.

נגזרות של פולי (דיאלקילפולרן) משמשות כשכבה פולטת אור באורך גל ספציפי המאפשר תצוגת צבע ספציפי.

פולי (פירול) נבחנו כציפוי מסכים בולעי גלי מיקרו. יישום זה משמש ליישומים צבאיים כגון חמקני ראדאר. פוליאנילין מראה תחום רחב של צבעים כתוצאה ממספר רב של צורות פרוטונציה ואוקסידציה, ויכול לשמש "חלונות חכמים" שבולעים את אור השמש בקיץ ואפשרו בניית בתים המותאמים אקולוגית לסביבתם וחשכניים באנרגיה המשמשת למיזוג וקירור. העובדה ששינויי קונפורמציה קטנים בפולימרים מצומדים יכולים להשפיע רבות על פער הפס, שימשה לפיתוחם של חיישנים מבוססי פוליתיופן.

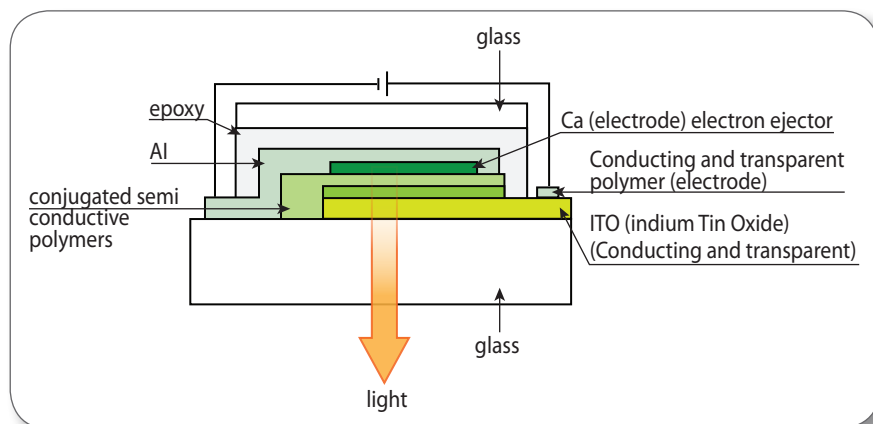
נגזרות של פוליתיופן הן מבטיחות בתחום של טרנזיסטורים

באור אולטרה-סגול (UV) של חומר המוצא הנוזלי גורמת לצילוב בין המולקולות שלו ולהתקשות החומר למוצק בלתי מסיס. בדרך זו יהיה אפשר לצפות משטח באוליגוטרון באמצעות סחרורו, ואז ליצור תבניות באמצעות הקרנת קרני-UV דרך מסכה.

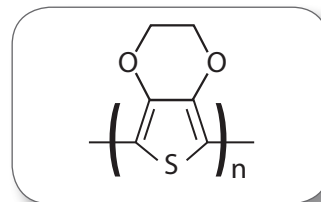
לחילופין, יהיה אפשר להדפיס את התבנית במדפסת להזרקת דיו ולקבע אותה בהקרנת UV. תהליך הזרקת הדיו דומה מאוד להדפסה גרפית, אבל במקום להשתמש בדיו צבעוני מזרימים על המצע טיפות זערוריות של תמיסת הפולימר בתבניות שצורתן מבוקרת היטב. עד כה הצליחו להדגים את התהליך בתבניות גדולות ממדים רק באופן עקרוני, אך לא הכינו שום התקנים אלקטרוניים בשיטה זו.

התחבולה שאפשרה את קבלת הפולימר המסיס אוליגוטרון הייתה חיבור קבוצות כימיות מתאימות לקצות המונומרים, היחידות המרכיבות את המולקולות השרשרתיות של PEDOT. סביר להניח שיהיה אפשר ליצור גרסות של אוליגוטרון בעלות תכונות ייחודיות באמצעות שינוי קבוצות הקצה האלה. למשל, אוליגוטרון בעל קבוצות קצה פוטו-אלקטריות יוכל לשמש לייצור תאים סולריים.

אחד השימושים של פולמרים אורגניים הוא דיודה פולטת אור (Light-Emitting Diode, LED) שמובא ביתר פירוט להלן: Electroluminescence = אלקטרולומינצנסיה: אור שנפלט משכבה דקה של הפולימר עקב עירורו באמצעות שדה חשמלי. הדיודה בנויה משכבה של פולימר מוליך כאלקטרודה, שכבה אמצעית של פולימר מוליך למחצה, ושכבה דקה של נייר מתכתי כאלקטרודה. **איור 14** (Bengt & Krutmeijer, 2000)



חומצה סולפנית עשוי לשמש כחומר ציפוי תחליבים של סרטי צילום למניעת היווצרות חשמל סטטי וכחומר אלקטרודי להזרקת חורים בהתקנים פולימריים פולטי אור (ראו את ההסבר על ה-PLED להלן).



איור 13: PEDOT (Patra & Bendikov, 2010)

המידע על היישומים המרתקים של הפולימרים המוליכים אינו נחלתם של כימאים בלבד. מידע זה מוצא את דרכו אל העיתונות הפופולרית ומובא לידיעת הציבור הרחב. להלן קטע מצוטט מאתר ynet מדע שפורסם בתאריך 21/09/2005 (<http://www.ynet.co.il/articles/0,7340,L-3144805,00.html>) ושמתאר בעיות בעיבוד PEDOT ופתרונות:

"אחת הבעיות בעיבוד פולימרים מוליכים לעומת החומרים הפלסטיים בתעשיות אחרות, היא אי מסיסותם בממסים אורגניים נוחים. למשל, קיבוע הפולימר פולי-אתילן-דיאוקסי-תיאופן (PEDOT) נעשה בדרך כלל בתמיסה חומצית מימית שתכונותיה המשתכחות (קורוזיביות) גורמות בעיות נוספות.

באפריל 2004 הודיעה חברת TDA Research מווייט רידג' שבקולורדו על פיתוח סוג חדש של PEDOT, שכינתה בשם אוליגוטרון, המסיס בממסים אורגניים בלתי משתכים. הקרנה

איור 14:
ITO: אלקטרודה ל"הזרקת" חורים,
Ca: מתכת "להזרקת" אלקטרונים
פליטת האור היא תוצאה של רקומבינציה
של נשאי מטען בפולימר, כשאלקטרונים
מהצד האחד וחורים מהצד האחר
מתאחדים. סוג הצבע שנפלט הוא בהתאם
לפס הפער בין ה-"הומו" ל-"לומו".

סיכום

פולימרים שבנויים ממקרומולקולות אורגניות, יכולים להוליך חשמל בתנאים מסוימים. העובדה הזאת אינה מתיישבת עם ההכללה שמשמשת אותנו בהוראת הכימיה בבי"ס התיכון: חומרים מולקולריים אינם מוליכים חשמל במצב המוצק והנוזלי.

השימוש בהכללות בהוראת הכימיה יכול להיות חיוני לצורך ארגון הידע של התלמידים, אך ישנו מקום חשוב לסייג את ההכללה ולתת פתח לסטייה ממנה. הרבה פריצות מדעיות יכולות לבוא מהחשיבה "מחוץ לקופסה".

לדעתנו נחוץ חקר של השפעת השימוש בהכללות יתר בהוראה בכלל ובהוראת הכימיה בפרט על חשיבתם של התלמידים. במחקר כזה ניתן לבדוק אם השימוש בהכללות יתר עלול לתרום לקיבוע המחשבה ולהקשות על החשיבה "מחוץ לקופסה".

מקורות

Bengt, N., & Krutmeijer, E. (2000). Conductive Polymers. Stockholm: The Royal Swedish Academy Of Science.

Patra, A., & Bendikov, M. (2010). Polyselenophenes. *J. Mater. Chem.*, 20, 422-433.

Roncali, J. (1992). Conjugated Poly(thiophenes): Synthesis, Functionalization, and Applications. *Chem. Rev.*, 92, 711-738.

Shirakawa, H., Louis, E.J., Macdiarmid, A. G., Chiang, C. K., & Heeger, A. J. (1977). Synthesis of Electrically Conducting Organic Polymers: Halogen Derivatives of Polyacetylene (CH)_x. *J. Chem. Phys.*, 66, 578-580.

<http://stwww.weizmann.ac.il/ptc/Tehuda/27-1/3-13.pdf>

עיבוד: יעל שוורץ וח'אלד מסאלחה

כשמסופק מתח בין שתי האלקטרודות, הפולימר המוליך למחצה פולט אור.



איור 15: דוגמאות לשימושים בנורות LED:

שלטים המציגים זמני הגעה של אוטובוסים, נורת הבקרה בשלט טלוויזיה, פנסי מכוניות, רמזורים ופנסים קטנים

זה המקום להעיר כי תחום זה מתפתח במהירות, וקצב כניסתם של יישומים חדשים לשוק הוא מהיר.