

מדידת אנרגיית הקשר של האלקטרון במוליך למחצה

מרק גלר, בית חינוך אזורי ע"ש עמי אסף
אלכסנדר רובשטיין, מכון דוידסון, רחובות

מה חדש
במעבדה?



מבוא

התנגדות חשמלית היא נושא חשוב מאוד בלימודי החשמל. בדרך כלל מלמדים על ההתנגדות החשמלית של מתכות (ה"מצייתות" לחוק אום), וממיינים נגדים על פי תכונות ההולכה החשמלית שלהם. ואולם חוק אום מתאים לקבוצה קטנה מאוד של חומרים: מתכות הנמצאות בטמפרטורה הקרובה יחסית לטמפרטורת החדר. כאשר הטמפרטורה של המוליך עולה על 500 מעלות צלזיוס לא קיים יחס ישר בין המתח והזרם, משום שההתנגדות החשמלית של המתכת גדלה בעקבות עליית הטמפרטורה (המקדם של תלות ההתנגדות בטמפרטורה הוא חיובי). במוליכים למחצה התמונה שונה. ההתנגדות החשמלית דווקא יורדת עם עליית הטמפרטורה (המקדם של תלות ההתנגדות בטמפרטורה שלילי). בעבודה המתוארת במאמר זה בנינו מערכת למדידת ההתנגדות החשמלית של מוליך למחצה ובעזרתה מדדנו את תלות ההתנגדות בטמפרטורה. על סמך תוצאות המדידה מצאנו את אנרגיית הקשר של האלקטרון באטום של מוליך למחצה.

מוליכות חשמלית במוצקים

כדי להבין את תכונות ההולכה החשמלית של גביש מוצק, יש להבין קודם את המבנה של רמות האנרגיה שלו (מודל הפסים). לפי מכניקת הקוונטים, אטום בודד אינו יכול להימצא בכל אנרגיה, אלא רק ברמות אנרגיה בדידות, כאשר כל רמה כזו מאופיינת בסידור שונה של האלקטרונים שבאטום. נשאלת השאלה כיצד ישתנו רמות אלה אם נקרב אטומים רבים זה לזה כדי ליצור שריג מוצק? מתוך התאוריה הקוונטית של מוצק, עולה כי כל רמת אנרגיה אטומית מתפצלת ל- N רמות כאשר N הוא בסדר גודל של 10^{23} . רמות אלה מתחלקות ל"פסים", כאשר בכל פס הרמות כה צפופות כך שלמעשה הן יוצרות רצף. בדומה לאטום בודד, בין כל שני פסים יש פער שאין בו רמות אנרגיה מותרות. שני פסים הם בעלי חשיבות מיוחדת: כאשר המוצק נמצא במצב המאופיין על ידי פס האנרגיה הנמוך, מרבית האלקטרונים בו מעורבים בקשרים הכימיים שבין האטומים המרכיבים את המוצק. פס אנרגיה זה נקרא "פס הערכיות", וכשהמוצק נמצא במצב אנרגטי זה מספר האלקטרונים החופשיים בו למעשה אפסי והוא אינו מוליך. כאשר המוצק נמצא במצב המאופיין על ידי פס האנרגיה הגבוה יותר, מספר האלקטרונים החופשיים בו גדל באופן דרסטי, והוא הופך למוליך. משום כך נקרא פס אנרגיה זה בשם "פס ההולכה". פער האנרגיה בין פס הערכיות לפס ההולכה מסומן כך:

$$E_g = E_c - E_v$$

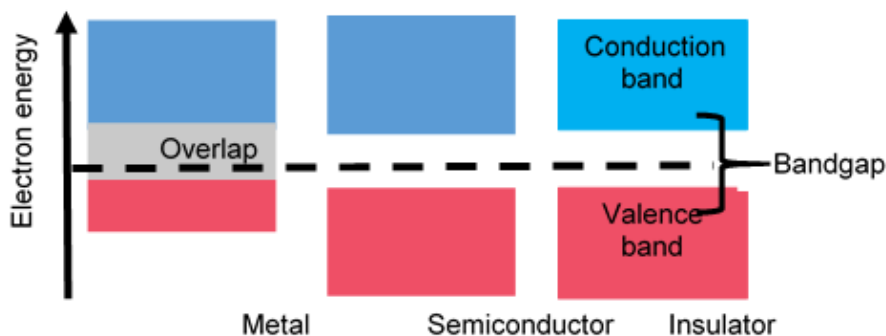
כאשר E_g - פער האנרגיה, E_c - האנרגיה של פס ההולכה, E_v - האנרגיה של פס הערכיות. האלקטרונים במוצק (כמו באטום) מקיימים את חוק האיסור של פאולי שלפיו בכל רמת אנרגיה יכולים להימצא בו-זמנית שני אלקטרונים בלבד בעלי ספין הפוך. התפלגות האלקטרונים בפסי האנרגיה הקובעת את תכונות ההולכה של המוצק תלויה בטמפרטורה. אפשר לחלק את המוצקים ל-3 משפחות על פי ההולכה החשמלית בטמפרטורת החדר:

1. מבדד - חומר שאינו מוליך, כגון יהלום או קוורץ.

2. מוליך - חומר שהוא מוליך חשמל טוב, בעיקר מתכות.

3. מוליך למחצה - חומר שהמוליכות החשמלית שלו נעה בין מבודד לבין מוליך, כגון גרמניום וסיליקון.

חשוב להדגיש שמוליכות המוליכים למחצה עולה עם עליית טמפרטורה, בעוד שמוליכות המתכות יורדת עם עליית הטמפרטורה. איור 1 מציג את ההבדל בין מבודד, מוליך חשמלי ומוליך למחצה בטמפרטורת החדר:



איור 1: מבנה רמות האנרגיה של מוצקים שונים

מהסרטוט אפשר להיווכח שבמבודד (Insulator) פס הערכיות מלא אלקטרונים, לכן אין אפשרות לאלקטרון לנוע בתוך פס הערכיות (Valence band). כדי ליצור הולכה בחומר מבודד יש להשקיע כמות אנרגיה מסדר גודל של 3 eV - הפער במבודד בין פס הערכיות לפס ההולכה. זוהי אנרגיה גדולה שבדרך כלל תהרוס את מבנה המבודד.

במתכת המצויה בטמפרטורת החדר פס ההולכה (Conduction band) חופף בחלקו לפס הערכיות, כך שפער האנרגיות ביניהם הוא למעשה אפס. בגלל זה בפס ההולכה יש הרבה אלקטרונים חופשיים שיכולים לנוע.

במוליך למחצה (Semiconductor) קיים פער אנרגיה אך הוא קטן, וכבר בטמפרטורת החדר ($T = 300\text{K}$) מספר לא מבוטל של אלקטרונים נמצא בפס ההולכה (עקב התנועה התרמית שלהם). עם עליית הטמפרטורה עוברים חלק מהאלקטרונים מפס הערכיות לתוך פס ההולכה, דבר המסביר את הפיכתו של המוליך למחצה למוליך טוב יותר.

לפער האנרגיה בין פס הערכיות לפס ההולכה אפשר להתייחס כמו אל אנרגיית הקשר של אטום - תוספת האנרגיה הדרושה כדי לנתק אלקטרון מהאטום.

תרמיסטור הוא מוליך למחצה הפועל על סמך עיקרון זה והופך למוליך עם עליית הטמפרטורה שלו.

התרמיסטור

בניסוי למדידת אנרגיית הקשר של האלקטרונים במוליך למחצה השתמשנו בתרמיסטור. התרמיסטור הוא נגד רגיש שהתנגדותו החשמלית תלויה בטמפרטורה. בשל רגישותו הגבוהה לשינויים בטמפרטורה משתמשים בתרמיסטור למדידת טמפרטורה בדיוק רב.

אפשר למיין את התרמיסטורים ל-2 קבוצות על פי התכונות החשמליות של החומרים שמהם הם עשויים:

א. תרמיסטור בעל מקדם התנגדות שתלתו בטמפרטורה שלילית (ככל שהטמפרטורה שלו עולה, ההתנגדות החשמלית שלו קטנה).

ב. תרמיסטור בעל מקדם התנגדות שתלתו בטמפרטורה חיובית (ככל שהטמפרטורה שלו עולה, ההתנגדות החשמלית שלו גדלה).

המוליכים למחצה, כמו הסיליקון לדוגמה, שייכים לקבוצה הראשונה. בטמפרטורת החדר יש להם כמות קטנה מאוד של אלקטרונים חופשיים. בתהליך החימום של חומרים אלה כמות האלקטרונים החופשיים עולה, וכתוצאה מכך עולה המוליכות של החומר ויורדת ההתנגדות.

למידת אנרגיית הקשר של האלקטרונים במוליך למחצה השתמשנו בתרמיסטור מהסוג הראשון, שכאשר מחממים אותו - התנגדותו יורדת. לצורך ביצוע הניסוי היה עלינו לחמם את התרמיסטור ולמדוד במקביל לכך את הטמפרטורה שלו ואת התנגדותו החשמלית. מערכת הניסוי כללה את המרכיבים הבאים:

א. תרמיסטור

ב. נגד בעל התנגדות של 1 אום וספק חשמלי המחובר אליו לצורך החימום של התרמיסטור

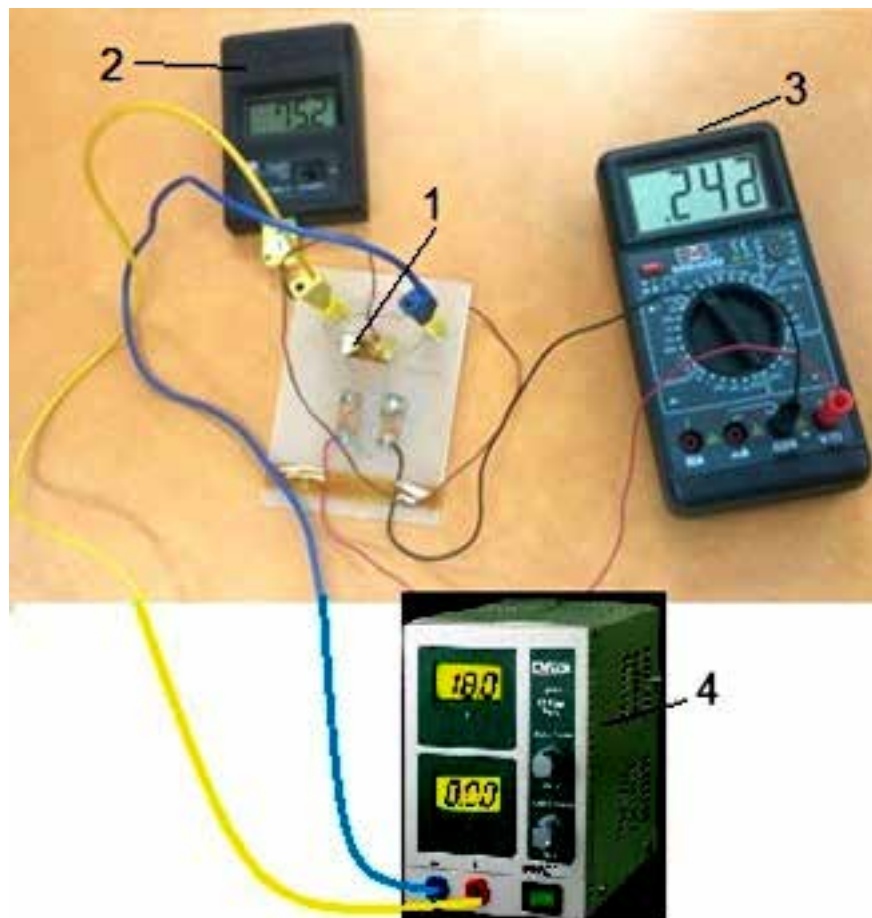
ג. צמד תרמי ומדחום דיגיטלי המחובר אליו לצורך מדידת הטמפרטורה של התרמיסטור

ד. מולטימטר למדידת ההתנגדות של התרמיסטור.

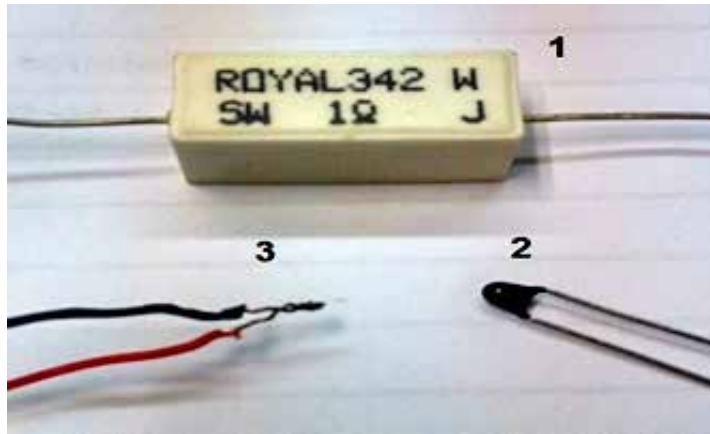
צריך להדגיש שהתנגדותו של התרמיסטור בטמפרטורת החדר היא בסדר גודל של אחד קילו-אום, ודיוק המדידה בעזרת המולטימטר גבוהה יחסית. דיוק המדידה של הטמפרטורה של התרמיסטור בעזרת הצמד התרמי הוא מסדר גודל של 0.1 מעלה צלסיוס. בביצוע הניסוי צריך לחכות זמן מסוים עד שהטמפרטורה של התרמיסטור בתהליך החימום נשארת קבועה, ורק אחרי כן להגדיל את המתח נגד החימום בעזרת הגדלת המתח של הספק החשמלי.

מדידת ההתנגדות החשמלית של התרמיסטור כתלות בטמפרטורה

מערכת הניסוי מוצגת בצילומים הבאים (1 ו-2):



צילום 1: מערכת המדידה; 1 - לוחית אם התרמיסטור וגוף החימום (נגד); 2 - מד טמפרטורה; 3 - מד התנגדות; 4 - ספק כוח.



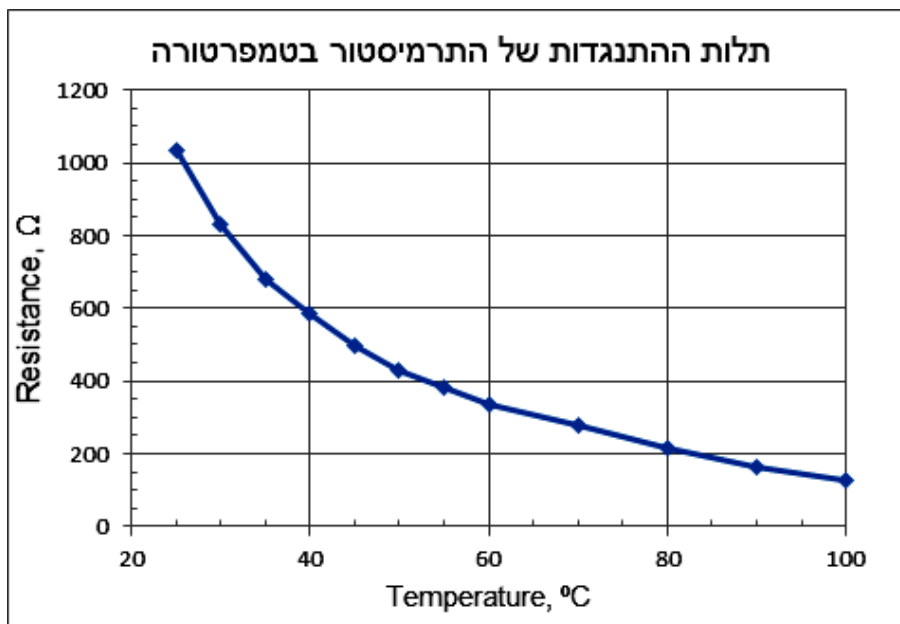
צילום 2: לוחית האם (פריט 1 בצילום 1) מכילה תרמיסטור (מוליך למחצה), נגד חשמלי מחובר לתרמיסטור וצמד טרמי למדידת טמפרטורה

מהלך הניסוי

מפעילים את הספק (ראו צילום 1), והנגד מתחמם ומחמם את התרמיסטור. מאחר שהתרמיסטור קטן מאוד, הטמפרטורה שלו מגיעה בתוך זמן קצר מאוד לזו של הנגד שאת הטמפרטורה שלו אנו מודדים. את ההתנגדות של הנגד מודדים בעזרת מד התנגדות. בעזרת ספק הכוח משנים את ההספק החשמלי בנגד, וכתוצאה מכך גם את הטמפרטורה שלו. תוצאות המדידה מופיעות בטבלה 1 ובאיור 2.

טבלה 1. תוצאות מדידת תלות ההתנגדות בטמפרטורה:

216	278	338	382	428	499	588	682	830	1033	R(Ω)
80	70	60	55	50	45	40	35	30	25	T($^{\circ}$ C)



איור 2: תלות ההתנגדות של התרמיסטור בטמפרטורה

ניתן לראות שההתנגדות של התרמיסטור יורדת עם העלייה של הטמפרטורה. הקשר בין ההתנגדות ובין הטמפרטורה בא לידי ביטוי בנוסחה הבאה (ראו [1]):

$$R = R_0 e^{\frac{W}{kT}}$$

T - טמפרטורת המוליך

k - קבוע בולצמן.

R - ההתנגדות של המוליך למחצה

R_0 - קבוע אופייני של החומר המוליך

W - מרווח האנרגיה בין פס הערכיות

ובין פס ההולכה במוליך למחצה

על מנת למצוא את אנרגיית הקשר W , נעשה לינאריזציה של המשוואה:

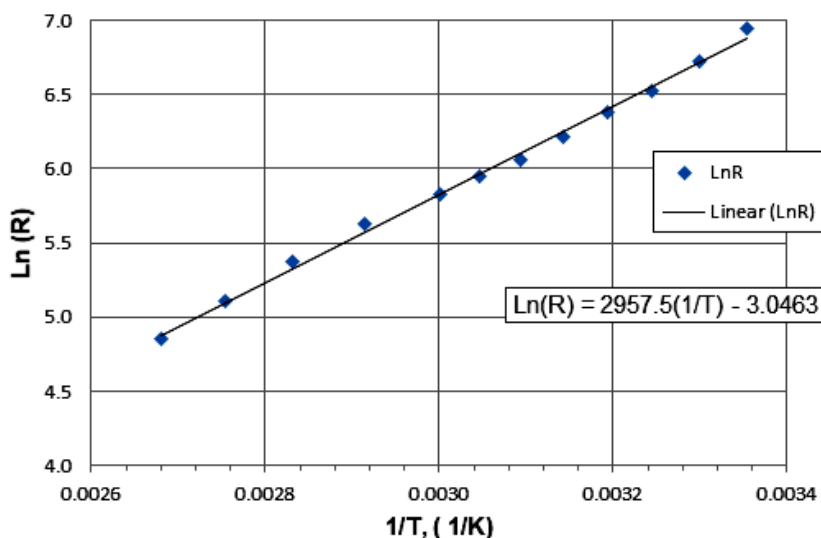
$$\ln R = \ln R_0 + \frac{W}{kT}$$

החישוב המתאים מיוצג בטבלה 2.

טבלה 2: חישוב המשתנים החדשים $\ln(R)$ כפונקציה $1/T$

t (°C)	T(K)	1/T(1/K)	R(Ω)	Ln(R)
25	298.15	0.00335	1033	6.9402
30	303.15	0.00330	830	6.7214
35	308.15	0.00325	682	6.5250
40	313.15	0.00319	588	6.3767
45	318.15	0.00314	499	6.2126
50	323.15	0.00309	428	6.0591
55	328.15	0.00305	382	5.9454
60	333.15	0.00300	338	5.8230
70	343.15	0.00291	278	5.6276
80	353.15	0.00283	216	5.3753
90	363.15	0.00275	165	5.1059
100	373.15	0.00268	128	4.8520

הגרף על פי המשתנים החדשים מיוצג באיור 3



איור 3: תלות לוגריתם טבעי של ההתנגדות כפונקציה של $1/T$

כפי שניתן לראות, הגרף הוא ליניארי. מוצאים את משוואת הקו הישר:

$$y = 2957.5x - 3.0463$$

על ידי השוואת מקדמים נוכל לכתוב את הקשר הבא:

$$\ln(R) = 2957.5 \cdot \frac{1}{T} - 3.0463$$

השיפוע של הגרף הוא 2957.5. נשווה לשיפוע הפונקציה:

$$2957.5 = \frac{W}{k}$$

k הוא קבוע בולצמן, והוא $1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$. מכאן נקבל את אנרגיית הקשר של האלקטרונים בחומר שממנו עשוי התרמיסטור:

$$W = 4 \times 10^{-20} \text{ J} = 0.25 \text{ eV}$$

סיכום

בנינו מערכת למדידת אנרגיית הקשר של אלקטרונים במוליך למחצה שממנו עשוי התרמיסטור. השתמשנו בתרמיסטור בגלל הקשר החזק בין התנגדותו לטמפרטורה שלו. בניסוי מדדנו את ההתנגדות של התרמיסטור כתלות בטמפרטורה. התנגדות התרמיסטור תלויה גם באנרגיית הקשר בין האלקטרונים לבין האטומים שמהם עשוי הגביש המוליך למחצה. על פי תלות זו עיבדנו את תוצאות המדידה ומצאנו את אנרגיית הקשר. התוצאה שקיבלנו מאשרת את סדר הגודל של אנרגיית הקשר של האלקטרון במוליך למחצה, כפי שהיא ידועה בספרות המדעית. צריך להדגיש שהניסוי שביצענו מאפשר להעריך בניסוי פשוט את אנרגיית הקשר של מוליך למחצה. אנחנו ממליצים לעשות את הניסוי הזה כאשר לומדים על הולכה חשמלית בחומרים שונים, וגם בנושא האפקט הפוטואלקטרי. אנחנו חושבים גם שהמחקר יכול לעזור למורים בהוראת הנושא של ההולכה החשמלית בנגדים שונים.

מקורות

1. בר-לב, א, מוליכים למחצה ותקנים אלקטרוניים, מכלול, חיפה, 1990
2. גלילי עובדיה קרינה וחומר - מבוא לפיזיקה מודרנית, יש, חולון, 2006
3. רוזן, ע, קרינה וחומר - מודלים של האטום וגרעין, המחלקה להוראת המעדים, מכון ויצמן למדע, רחובות, 2007

