

### פרק 3: המבנה האלקטרוני של מוצקים

הפרק השלישי עוסק בנושא המבנה האלקטרוני של מוצקים סביב שני מוקדים יישומיים מרכזיים: דיודה ודיודה פולטת אור - LED. הפרק מלווה בביצוע ניסוי מעבדה ופעילויות ממוחשבות. נעשית העמקה בתכני הלימוד התיאורטיים המפורטים בטבלה מס' 3.1:

| מושגים מרכזיים   | מושגי עזר       |
|--|-----------------|
| פסי אנרגיה מותרים ואסורים, מוליך למחצה, מוליך למחצה מסוג P-N | הסממה - Dopping |

#### טבלה מס' 3.1 – מושגים מרכזיים ומושגי עזר בפרק השלישי

בפעילות הראשונה בפרק, נחשפים התלמידים למידע המתואר באופן סיפורי על סוגי מנורות. ישנה התמקדות בסוג מנורה חדש לתלמידים – דיודה פולטת אור – LED הבנויה ממוליך למחצה. מתוך קריאת המידע עולה השאלה המרכזית בפרק: במה שונה המבנה האלקטרוני במוליך למחצה מזה של מוצקים אחרים? כיצד מאיר חומר זה, ומדוע ישנם יתרונות כה רבים לנורת ה-LED? באופן הדרגתי, לאורך הפרק, ניתן מענה לשאלה זו תוך העמקה בתכנים כימיים רלוונטיים.

#### ניסוי: מוליך, מבודד ומה שביניהם...

לניסוי שתי מטרות מרכזיות:

1. הולכה של חומרים מוליכים אינה זהה
  2. הכרות עם דיודה המוליכה חשמל בכיוון אחד ואינה מוליכה בכיוון שני
- התלמיד נחשף לתופעה חדשה בתחום מוליכות חשמלית של חומרים – דיודה הבנויה ממוליך למחצה. במהלך העבודה התלמיד בונה מעגל חשמלי פשוט, ובודק מוליכות של חומרים שונים. חלק זה מוכר לתלמיד מלימודיו הקודמים, הוא מכיר חומרים מוליכים כמו מתכות וגרפיט וחומרים מבודדים כמו עץ פלסטיק זכוכית ועוד. בין פסי המתכת יבדוק התלמיד חוט מתכת עם התנגדות גבוהה. התלמיד יראה כי עצמת המנורה קטנה. כמו כן יתקל התלמיד ברכיב חדש – הדיודה. כאן יגלה התלמיד חומר המוליך כאשר הדקי הספק מכוונים בכיוון אחד, ומבדד כאשר הם מחוברים הפוך. התנסות זו אמורה לדרוש מהתלמיד להרחיב את מושגיו ואופן חשיבתו על חומרים מוליכים וחומרים מבודדים. בחלק האחרון במדריך המורה לפרק זה מצורפת פעילות הרחבה של הניסוי להעשרה.

## תשובות לשאלות הפרק

שאלה מס' 4:

התבוננו באיור מס' 3.1 וקבעו כיצד משתנה ההפרש באנרגיה בין האורביטלים הנוצרים במפגש של שני אטומי מתכת, ארבעה אטומי מתכת ושמונה אטומי מתכת?  
ככל שעולה מספר האטומים היוצרים קשר כימי ביניהם קטן הפרש האנרגיה בין האורביטלים הנוצרים מחפיפת אורביטלי האטומים.

שאלה מס' 5:

כאשר מתכת עוברת חמצון היא מאבדת את הברק המתכתי שלה (כסף משחיר, נחושת מוריקה, אלומיניום מאפיר).

א. מדוע לדעתכם לתחמוצות המתכת אין ברק? התייחסו למבנה פסים.

לתחמוצות המתכת מבנה פסים אשר בו הרמה הגבוהה ביותר בה מאוכלסים אלקטרוני הערכיות ממוקמת בקצהו העליון של פס, כך שקיים פער אנרגיה בינה לבין רמות אנרגיה לא מאוכלסות. אין ניידות רבה לאלקטרוני פס הערכיות ואין די אנרגיה לעורר אלקטרונים אלו לאורביטלים ריקים ובכך להאיץ את תנועתם.

ב. האם לדעתכם תחמוצות המתכות תהיינה מוליכות טובות יותר או פחות בהשוואה למתכות? נמקו תשובתכם

תחמוצות המתכות יהיו מוליכות פחות טובות מהמתכות בגלל מבנה הפסים. הולכה טובה אפשרית כאשר רמת האנרגיה הגבוהה ביותר בה מאוכלסים אלקטרוני הערכיות ממוקמת באמצע הפס, כך שבצמוד לה נמצאות רמות אנרגיה לא מאוכלסות. מבנה פסים כזה מאפשר ניידות גבוהה של אלקטרוני הערכיות והולכה.

שאלה מס' 6:

מה מייצגים המעגלים האפורים באיור? רמות אנרגיה באטום

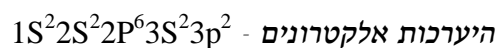
מה מייצגים העיגולים האפורים? גרעיני האטומים

מה מייצגים העיגולים השחורים? אלקטרונים

מה מייצג הסימון המקווקו? קשר קוולנטי בין אטומי הצורן

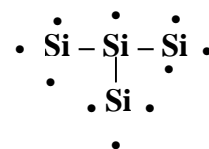
שאלה מס' 7:

רשמו היערכות אלקטרונית המתאימה לאטום צורן (Si).



שאלה מס' 8:

רשמו נוסחת ייצוג אלקטרונית לקטע מגביש של צורן (Si) הכולל ארבעה אטומים.



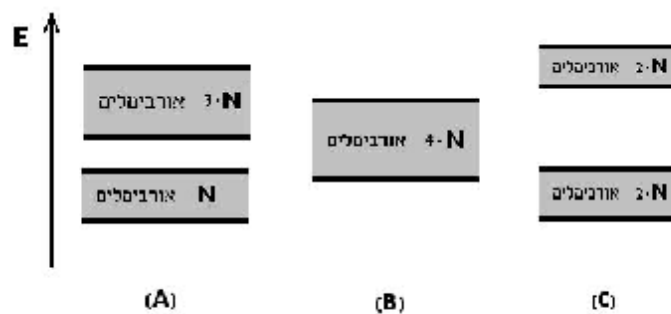
### שאלה מס' 9:

היעזרו בטבלה מס' 3.1 ובה הנתונים על האנרגיה הדרושה למעבר אלקטרון מחבורת הערכיות לחבורת ההולכה, עבור צורן גרמניום ופחמן-יהלום, ודרגו את שלושת החומרים לפי רמת ההולכה שלהם בטמפרטורת החדר. נמקו תשובתכם.

כמות האנרגיה הדרושה למעבר אלקטרון מחבורת הערכיות לחבורת ההולכה מעידה על רוחב "האזור האסור" עד לפס האנרגיה הבא. לגרמניום ערך האנרגיה הנמוך ביותר הדרוש למעבר אלקטרון מחבורת ערכיות לחבורת ההולכה ולכן ההולכה שלו תהיה הגבוהה מבין שלושת החומרים. לפחמן-יהלום הערך הגבוה ביותר ולכן נצפה שרמת ההולכה שלו תהיה הנמוכה ביותר. לצורן ההולכה בינונית.

### שאלה מס' 10:

לפניכם שלוש אפשרויות למבנה הפסים בהם מאוכלסים אלקטרוני הערכיות עבור גביש צורן ובו  $N$  אטומים:



איזו מדיאגרמות הפסים (A), (B) או (C) עשויה לתאר את מבנה הפסים האמיתי של גביש הצורן? נמקו תשובתכם.

לכל אטום צורן ארבעה אלקטרוני ערכיות. ל- $N$  אטומים של צורן בגביש  $4N$  אלקטרוני ערכיות המאכלסים  $2N$  אורביטלים (על פי כלל האיסור של פאולי בכל אורביטל לכל היותר 2 אלקטרונים). אם דיאגרמת A מתארת את מבנה הפסים בגביש צורן, אז  $N$  אורביטלים ימלאו את הפס התחתון ו- $N$  אורביטלים נוספים יהיו בפס שמעליו, אך הוא לא יהיה מלא ויתקבל מבנה פסים המתאים לחומר מוליך ולא למוליך למחצה. מקרה דומה יתקבל במקרה של דיאגרמה B.  $2N$  האורביטלים יהיו בפס האנרגיה שיהיה מלא רק עד מחציתו ויתקבל גם במקרה זה מבנה פסים המתאים למוליך. רק מבנה הפסים המתואר בדיאגרמה C מתאים לתיאור מבנה של מוליך למחצה.  $2N$  האורביטלים ימלאו את פס האנרגיה התחתון במלואו ופס האנרגיה הבא יהיה ריק מאלקטרונים. ההולכה תתאפשר כאשר תושקע אנרגיה להעברת אלקטרונים מן הפס המלא – פס הערכיות לפס הריק – פס ההולכה.

## שאלה מס' 11:

גרמניום ( $Ge$ ) הוא מוליך למחצה. בגביש של גרמניום ערוכים האטומים במבנה טטראדרי. בתהליך התגבשות גרמניום הוחלפו מעט מאטומי גרמניום באטומי אנטימון ( $Sb$ ) הנמצא בטור החמישי במערכה המחזורית.

א. קבעו איזה סוג מוליך למחצה התקבל. נמקו תשובתכם.

ב. שיערו כיצד תשתנה מוליכות גביש של גרמניום ( $Ge$ ) כתלות במספר אטומי אנטימון המוחלפים בו. הסבירו את השערתכם.

ג. שרטטו גרף המתאר את השתנות המוליכות של גביש גרמניום כתלות במספר אטומי האנטימון שהוספו.

מתקבל מוליך למחצה מסוג  $N$ . האלקטרון העודף של אטום האנטימון נותר ממוקם באורביטל על האטום. אורביטל זה נמצא בתוך הפער האסור של גביש נקי. ישנה תנועה חופשית של אלקטרונים והולכה חשמלית.

השערה: ככל שגדל מספר אטומי האנטימון המוחלפים בגביש תעלה מוליכות הגביש. אטומי האנטימון המוחלפים הם המקור לתנועת האלקטרונים בגביש. האלקטרונים העודפים ממוקמים באורביטלים גבוהים באנרגיה בהשוואה לאורביטלי פס הערכיות המלא של הגביש, ולמעשה נמצאים בתוך הפער האסור של גביש נקי. מכיוון שכך, די באנרגיה תרמית נמוכה יחסית על מנת לעורר את האלקטרון לפס ההולכה הריק, בו הוא חופשי לנוע בגביש.



יש להניח שההולכה מתייצבת בערך מסוים והחלפה נוספת של אטומי גרמניום באטומי אנטימון אינה משנה עוד את ערך ההולכה החשמלית.

## מקורות אינטרנט להעשרה:

מקור בנושא מוליכות חשמלית. אתר הכולל קישורים להיבטים שונים הקשורים להולכת חשמל.

<http://inventors.about.com/library/inventors/blelectric.htm>

מקורות בנושא תאורה וסוגי מנורות:

<http://inventors.about.com/library/inventors/bllight.htm>

<http://inventors.about.com/gi/dynamic/offsite.htm?site=http://americanhistory.si.edu/lighting>

מקור בנושא דיודה פולטת אור:

<http://electronics.howstuffworks.com/led2.htm>

## הרחבת הניסוי מוליך, מבודד ומה שביניהם – העשרה

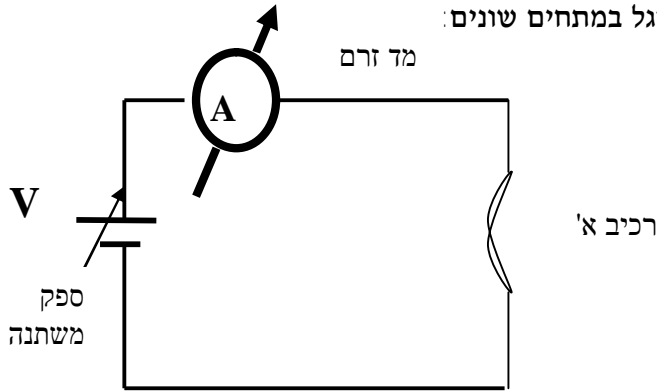
### חלק ב' -

בחלק זה של הניסוי תבדקו איך משפיע שינוי המתח על זרם חשמלי במעגל המכיל שני רכיבים מתוך החומרים שנבדקו קודם: חוט בעל התנגדות גבוהה, ודיודה מהלך העבודה:

א. בנו מעגל חשמלי המכיל: ספק משתנה (עד 24V), רב מודד מכוון למדידת זרם באמפר, חוט בעל התנגדות גבוהה. מדדו את הזרם במעגל במתחים שונים:

1.5, 3, 6, 12, 24 וולט

ב. רשמו וארגנו את תוצאות המדידה



ג. בנו מעגל חשמלי על פי השרטוט ועל פי הוראות המורה. המעגל יכיל ספק משתנה, נגד, דיודה א', מד זרם ומד מתח (מד המתח מחובר במקביל על פני הדיודה).

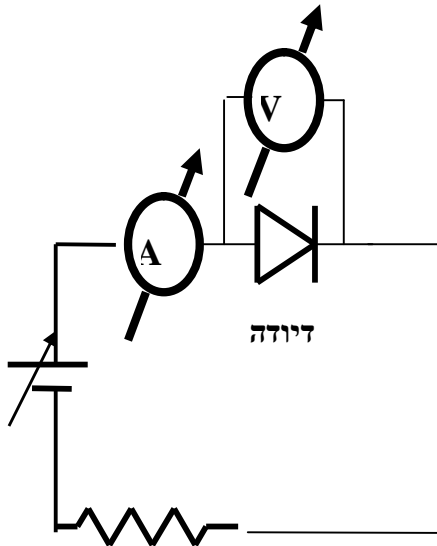
מד הזרם יכוון לסקלת מדידה של מיליאמפר mA.

מדדו את הזרם על פני הדיודה במתחים הבאים:

0.5V, 0.6V, 0.7V, 0.8 V. את המתח נקבע בעזרת

הספק המשתנה, אך המדידה תתבצע במד המתח על פני הדיודה. (שימו לב כי הערכים במד המתח על פני הדיודה נמוכים בהרבה, מאשר בספק הראשי).

ד. רשמו וארגנו תוצאות



### **סיכום:**

א. נסחו את שאלת החקר אותה חקרתם בניסוי

ב. קיבעו מהו המשתנה התלוי ומהו המשתנה הבלתי תלוי

ג. שרטטו גרפים המתארים את התוצאות הניסוי בחלקים א' ו-ב'

ד. תארו את שני הגרפים שהתקבלו. וערכו השוואה ביניהם

ה. מהן התכונות האופייניות לדיודה על פי הגרף שהתקבל?

ו. רשמו שאלות העולות בעקבות הניסוי

## חלק ג' –

בחלק זה של הניסוי תבדקו דיודות נוספות.

שאלת החקר: כיצד תושפע העקומה (זרם – מתח) כתלות בסוג הרכיב?

ציוד: כל הציוד מחלק ב'. שתי דיודות נוספות: דיודה ב' הבנויה גם היא מצורן Si- ודיודה ג'

מגרמניום-Ge.

### מהלך העבודה:

א. בנו מעגל חשמלי כמו בסעיף ב' בחלק הקודם של הניסוי. כווננו את סקלת הרב מודד

למידת זרם במיליאמפר. מדדו את הזרם על פני דיודה ב' במתחים הבאים:

0.5V, 0.6V, 0.7V, 0.75V (שוב יש להדגיש במד המתח המחובר ישירות לדיודה).

ב. חזרו על הניסוי עם דיודה ג' אך הפעם ממדו במתחים הבאים:

0.2V, 0.3V, 0.35V, 0.4V

ג. רשמו וארגנו את התוצאות.

### סיכום:

א. שרטטו גרפים שיתארו את התוצאות שקיבלתם

ב. השוו בין הגרפים השונים שקיבלתם. (כולל הגרף של דיודה א' מהחלק הקודם של הניסוי)

ג. לאילו מסקנות ניתן להגיע מהגרפים? התייחסו בתשובתכם לשאלת החקר

ד. רשמו שאלות חדשות העולות מהניסוי

### הנחיות למורה לביצוע הניסוי:

בחלק השני ישנו חקר מודרך – התלמיד בודק איך משפיע שינוי המתח על הזרם בשני רכיבים: חוט מתכת בעל התנגדות גבוהה ודיודה.

א. חוט המתכת הוא בעצם נגד. כדי לא להקשות על התלמיד עם מושג מתחום החשמל השתמשו בחוט כזה ולא בנגד. הגרף המתקבל הוא לינארי- ככל שעולה המתח עולה הזרם.

אם ישתמש התלמיד בחומר מוליך רגיל (עם התנגדות נמוכה) הוא יקבל גרף ישר מקביל לציר ה-Y

לכן נבחר חוט מתכת עם התנגדות. חומר מבודד ייתן כמובן זרם 0- והקו יוצא בעצם ציר ה-X.

ב. מדידת זרם ומתח על פני הדיודה מחייבת לבנות מעגל חשמלי קצת יותר מורכב. בניסוי

הראשון מדידת המתח נעשית על ידי הספק המשתנה. בעבודה עם הדיודה יש צורך לשים הגנה

של נגד בחוזק של  $1K\Omega$  (1 קילו אום) כדי להקטין את הזרם על פני הדיודה. מדידת הזרם היא

ביחידות מיליאמפר (יש להנחות את התלמידים למדוד בסקלה זו). עקב כך המתח על פני הדיודה

אינו המתח אותו מראה הספק המשתנה. יש צורך להוסיף מד מתח על פני הדיודה בנוסף למד

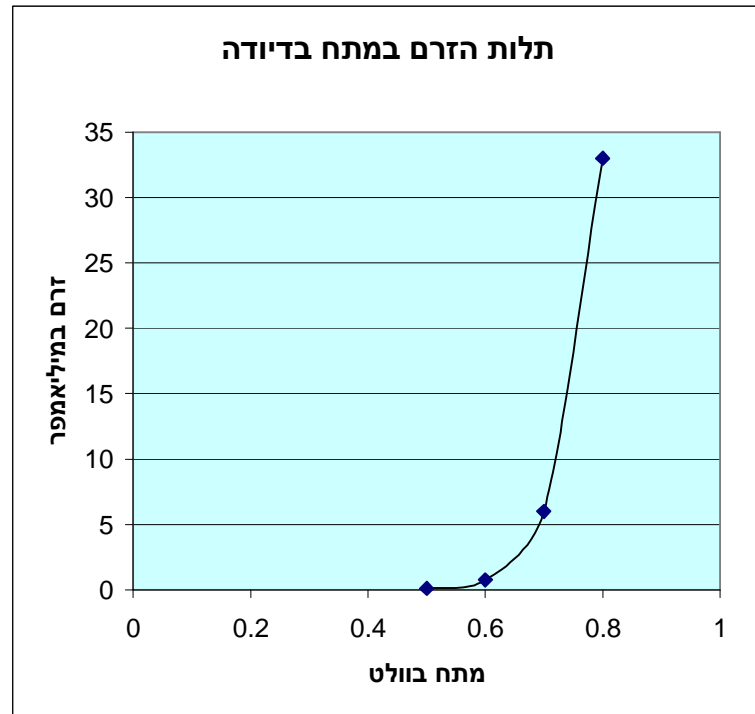
הזרם (את מד המתח מחברים במקביל לפי שרטוט המעגל בדף התלמיד).

כמו כן יש לשים לב לחבר את הדיודה בכיוון הנכון- בו היא מוליכה חשמל.

המתחים על פני הדיודה יהיו הרבה יותר נמוכים מהמתח החיצוני. במדידה יש להנחות את

התלמיד להתייחס למתח על מד המתח הצמוד לדיודה.

הגרף אותו אמור לקבל התלמיד הוא גרף פרבולי. ניתן לראות כי מעל מתח סף מסוים הדיודה הופכת להיות מוליך טוב, אם כי בזרמים ומתחים נמוכים יחסית. גרף זה הוא של דיודת צורן-Si בסימון: 1N914- בניסוי נקראת דיודה א'



בחלק השלישי התלמיד עוסק בחקר מודרך בו הוא עובד עם שתי דיודות נוספות. דיודה ב' מצורן (מומלצת דיודה 1N4007) ודיודה ג' מגרמניום (מומלצת דיודה 1N34). התלמיד יקבל גרפים דומים. במקרה של הגרמניום מתח הסף יהיה יותר נמוך (בסביבות 0.4 וולט).