

---

דואליות גל-חלקיק : האפקט הפוטואלקטרי והתאבכות אלקטרונים

---

### מטרת הניסוי

- הכרת האופי החלקיקי של האור והאינטראקציה בין אור לחומר.
- חישוב קבוע פלנק,  $h$ .
- הכרת הפוטודיודה ואפיוניה.
- הכרת האופי הגלי של האלקטרון.

בניסוי זה נבצע שניים מהניסויים שהובילו להבנה שלכל חומר יתכנו הן תכונות של גל והן תכונות של חלקיק :

- (1) האפקט הפוטואלקטרי שבו נימצא שלאור ישנם תכונות של חלקיק.
- (2) התאבכות אלקטרונים שבו נימצא שלאלקטרון תכונות של גל.

## האפקט הפוטואלקטרי

### ספרות עזר

תרגום לאנגלית של המאמר המקורי של איינשטיין מ-1905 :

[On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light](#)

[The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom \(pdf\)](#)

[The photoelectric effect: experimental confirmation concerning a widespread misconception in the theory \(pdf\)](#)

## 1. רקע

האפקט הפוטואלקטרי הוא השם שניתן לתופעה של פליטת אלקטרונים מחומרים (מתכות בעיקר), כתוצאה מפגיעת אור. התופעה נתגלתה לראשונה ע"י היינריך הרץ ב-1887. בתקופה זו שלטה התפיסה הקלאסית בדבר האופי הגלי של האור ובדרך זו הסבירו תופעות של עקיפה התאבכות ואף את צורת התפשטות האור כקרניים על פי מודל הוייגנס.

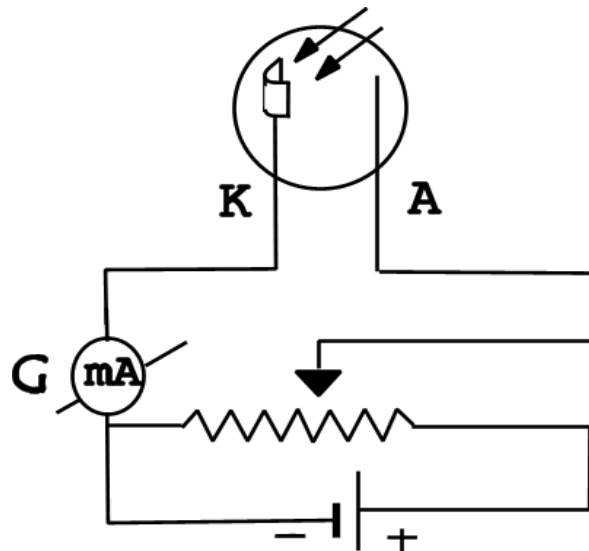
לפי התפיסה שהאור הוא בעל אופי גלי האנרגיה של האלקטרונים המשתחררים בעקבות פגיעת האור אמורה להיות יחסית לעוצמת האור. באופן ניסיוני נתגלה שלמרות שכמות האלקטרונים שמשחררת היא יחסית לעוצמת האור האנרגיה המרבית שלהם לא תלויה בעוצמה אלא באורך הגל.

בשנת 1905 פרסם אלברט איינשטיין תאוריה שמסבירה היטב את האפקט, התאוריה מבוססת על הנחה שלאור יש אופי חלקיקי והאנרגיה של כל חלקיק תלויה בתדירות שלו. בכך למעשה התחילה ההכרה בדבר האופי הדואלי של האור (גל/חלקיק), הכרה שמהווה את תחילת פיסיקת הקוונטים.

על הסבר האפקט זכה איינשטיין בפרס נובל לפיסיקה בשנת 1921.

## 2. תיאוריה

### 2.1 אופי האפקט

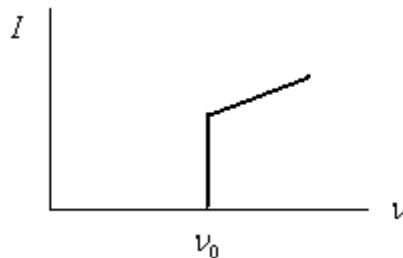


איור 1: תיאור סכמתי של שפופרת פוטואלקטרית

את התופעה של פליטת זרם מפני מתכת אל הריק כתוצאה מהקרנתה ניתן לראות באמצעות שפופרת פוטואלקטרית (ראה איור 1). זוהי שפופרת ריק המורכבת משני אלקטרודות מתכת: קתודה- בעלת שטח רחב, על מנת לאפשר לאור לפגוע בה ביעילות ואנודה, הבנויה כמוט דק. כאשר מפעילים מתח חיובי על האנודה ומקרינים את הקתודה בגא"מ (גל אלקטרומגנטי) בעל תדירות  $\nu$  מספיק גבוהה (או אורך גל מספיק קצר) יזרום בשפופרת זרם יחסי לעוצמת האור ולשטח הקתודה. כאשר לא פוגעת כל קרינה אלקטרומגנטית (א"מ) בקתודה (חושך מוחלט) לא נמדד כל זרם במעגל. המסקנה: הקרינה הא"מ שפגעה בקתודה גרמה לפליטת אלקטרונים ממנה, אלקטרונים אלה נמשכו לאנודה שהינה חיובית. זרימת הזרם במעגל תהיה קבועה ותימשך כל עוד עוצמת הקרינה בקתודה הנה קבועה. עוצמת הזרם במעגל הנה פרופורציונאלית למספר האלקטרונים המגיע לאנודה ביחידת זמן (קבוע הפרופורציה הנו מטען האלקטרון  $e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$ ). ככל שגדלה עוצמת האור גדל מספר זה, דהיינו, הזרם גדל.

נדון במספר מצבים המתארים את תכונות הפליטה הפוטואלקטרית:

א. נניח כי המתח בין האנודה והקתודה קבוע וכי מקרינים את הקתודה בגא"מ בעוצמה קבועה, אם משנים את תדירות הקרינה הפוגעת בקתודה, מתקבלת תוצאה המתוארת באיור 2.

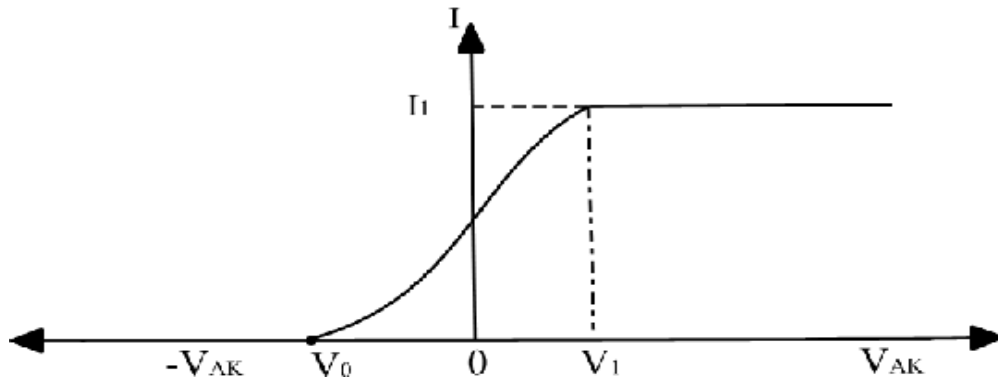


איור 2: "תדירות הסף" באפקט הפוטואלקטרי

כאשר התדירות נמוכה אין כל קריאה במד הזרם, דהיינו אין פליטה של אלקטרונים מהקתודה. בתדירות  $\nu_0$  מתקבלת בבת אחת קריאה במד הזרם, דהיינו, ב- $\nu_0$  התחילה פליטה של אלקטרונים מהקתודה (הנקראים גם בשם "פוטואלקטרונים"), כאשר ממשיכים להגדיל את  $\nu$  גדל הזרם. ניסוי כזה עבור קתודות שונות מוכיח כי לקתודות שונות מתאימה תדירות  $\nu_0$  שונה, תדירות זאת נקראת "תדירות הסף" (התדירות שהחל ממנה מתחילה פליטה פוטו-אלקטרית). התברר כי התחלת הפליטה של הפוטואלקטרונים איננה תלויה במתח בין האנודה

לקתודה (כל עוד האנודה חיובית ביחס לקתודה) או בעוצמת ההארה של הקתודה, התחלת הפליטה תלויה רק בתדירות.

ב. נניח כי מקרינים את הקתודה בגא"מ שתדירותו  $\nu_1$  הגדולה מתדירות הסף  $\nu_0$  ונניח כי עוצמת הקרינה הפוגעת בקתודה הנה קבועה. משנים את המתח בין האנודה והקתודה ומוודדים עבור כל מתח, את הזרם במעגל, התוצאה המתקבלת מתוארת באיור 3.



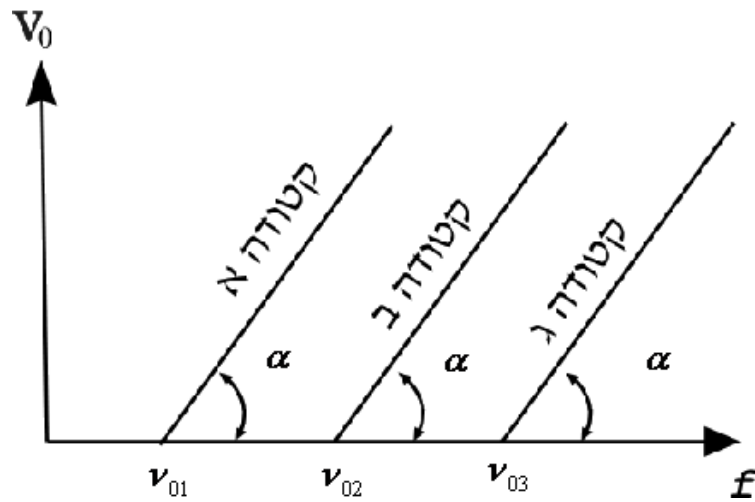
איור 3: זרם כתלות במתח השפופרת

עבור מתח קטן מ-  $V_0$  אין כל זרימה במעגל. ב-  $V_0$  מתחילה זרימה, מ-  $V_0$  ועד  $0V$  עולה הזרם במעגל, החל מ-  $0V$  האנודה הנה חיובית ביחס לקתודה, הזרם ממשיך לעלות עד  $V_1$  בערך, החל מ-  $V_1$  והלאה הזרם נשאר קבוע לכל  $V_{AK}$ . לתופעה שבה הזרם נשאר קבוע למרות העלאת  $V_{AK}$  קוראים בשם "רוויה". במצב זה  $V_{AK}$  מספיק גדול כדי לאסוף את כל האלקטרונים הנפלטים מהקתודה לאנודה.

אם נבדוק את תלות הזרם ב-  $V_{AK}$ , עבור תדירויות שונות מ-  $\nu_1$  (שהנן גדולות מ-  $\nu_0$ ) נראה כי מתקבלים גרפים דומים, פרט לעובדה שערך  $V_0$  משתנה, למתח  $V_0$  קוראים בשם "מתח העצירה".

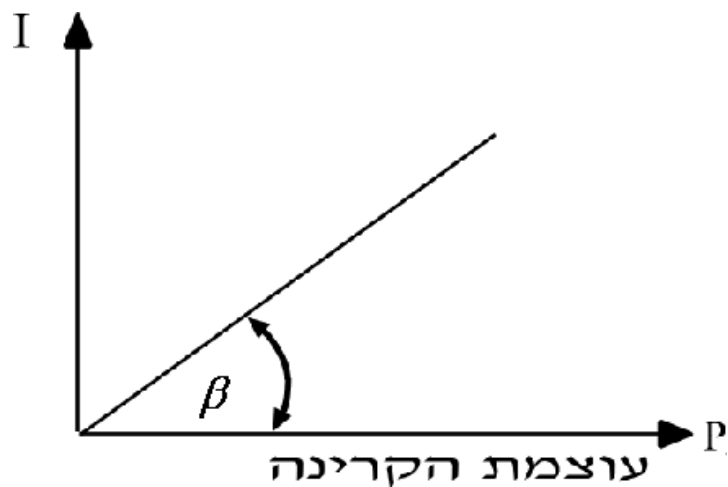
מתברר לכן כי לתדירויות הקרנה שונות (גדולות מ-  $\nu_0$ ) מתאימים מתחים עוצרים שונים ומתח העצירה גדל עם גדול  $\nu$ . אם מתארים עבור פוטוקתודות שונות את תלות המתח העוצר  $V_0$  בתדירויות הקרינה הא"מ  $\nu$  הפוגעות בהן, מקבלים את הגרף המתואר באיור 4. ניתן לראות כי לכל קתודה תדירות סף  $\nu_0$  שונה. הקווים הישרים מתארים את העובדה, שעבור כל קתודה המתח העוצר פרופורציונאלי ל-  $\nu - \nu_0$ .

העובדה החשובה ביותר שניתן להסיק מהגרפים הנה:  $\tan \alpha$  הינו גודל קבוע לכל הפוטוקתודות.



איור 4: מתח עצירה כתלות בתדירות האור

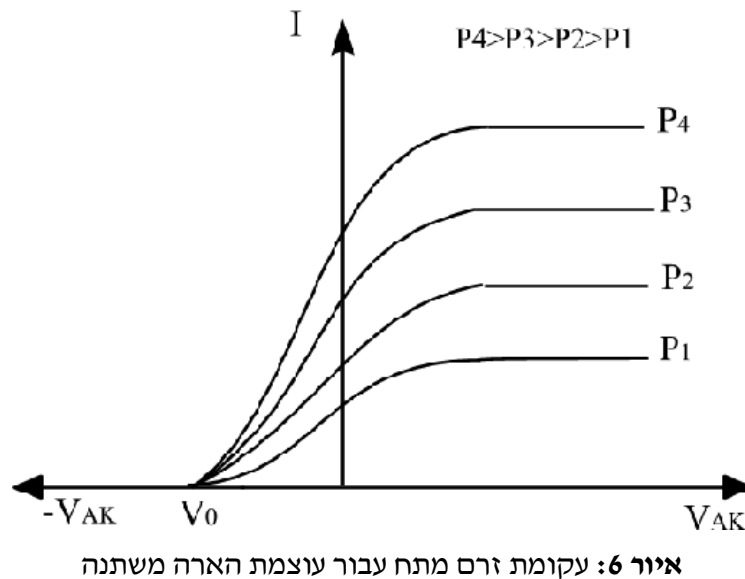
ג. נניח כי המתח בין האנודה והקתודה קבוע וכי מקרינים את הקתודה בגא"מ שתדירותו גדולה מתדירות הסף  $v_0$ . אם משנים עתה את עוצמת הקרינה הפוגעת בקתודה (עוצמת הקרינה הינה: כמות הקרינה הפוגעת בשטח הקתודה ביחידת זמן) ומודדים את הזרם במעגל, מתקבל הגרף המתואר באיור 5.



איור 5: זרם כתלות בעוצמת הקרינה

זהו קו ישר היוצר זווית  $\beta$  עם ציר עוצמת הקרינה. המסקנה מהגרף הנה: עבור  $v < v_0$  ומתח קבוע בין האנודה והקתודה, עוצמת הזרם פרופורציונאלית לעוצמת הקרינה הפוגעת בקתודה, דהינו מספר הפוטואלקטרונים המגיעים לאנודה ביחידת זמן פרופורציונאלי לעוצמת ההארה של הקתודה. נשאר עתה את  $v$  קבועה ונמדוד

עבור עוצמות הקרנה שונות  $P$ , את תלות הזרם במתח  $V_{AK}$ . אם נשרטט תוצאות אלה במערכת צירים אחת נקבל את מערכת הגרפים המתוארת באיור 6.



ולכן: מספר הפוטואלקטרונים הנפלטים מהקתודה ביחידת זמן, פרופורציונאלי לעוצמת ההקרנה (קבוע הפרופורציה הינו  $e$ ).

ד. נניח כי המתח בין האנודה והקתודה חיובי ומקרינים את הקתודה בגא"מ שתדירותו  $\nu$  קבועה ( $\nu_0 < \nu$ ). במצב זה יזרום זרם במעגל. נפסיק את הקרנת הקתודה והזרם במעגל יפסק. אם נקריין שוב את הקתודה ונמדוד את הזמן הדרוש מרגע פגיעת הקרינה בקתודה ועד לרגע התחלת זרימת הזרם במעגל. דהיינו, את הזמן הנמשך מפגיעת הקרינה בקתודה ועד לתחילת פליטת הפוטואלקטרונים, נקבל כי, זמן זה קצר ביותר (קטן מ-  $10^{-8}$  שנייה).

כל התוצאות הניסיוניות שתוארו לעיל התקבלו במעבדותיהם של הפיסיקאים בסוף המאה ה-19 ותחילת המאה ה-20. תוצאות אלו מהוות את כל האינפורמציה הניסיונית החשובה הקשורה באפקט הפוטואלקטרי.

נשאר היה רק למצוא הסבר תיאורטי משכנע לתוצאות אלו. הקשיים נבעו מכך שתוצאות ניסיוניות אלו סתרו תיאוריות חשובות ומבוססות, אודות תכונות הקרינה הא"מ כגל, כך למשל לא ניתן היה להסביר קיום  $\nu_0$  מסוים לכל פוטוקתודה, או כאשר ניסו לחשב לפי התאוריה הגלית של האור את הזמן הנמשך מתחילת פגיעת

הקרינה הא"מ בקתודה ועד תחילת פליטת הפוטואלקטרונים, קיבלו כי זמן זה יכול להגיע אף לשנים רבות ואילו בניסוי התקבלה פליטה "מיידית".

## 2.2 ההסבר לאפקט

את ההסבר לתופעה נתן איינשטיין ב - 1905. הוא הציע להניח כי הקרינה הא"מ מורכבת מזרם חלקיקים (בניגוד לתיאור הקרינה הא"מ כגל) חסרי מסה אך בעלי אנרגיה מסוימת השווה ל- $h\nu$ , כאשר  $\nu$  הינה תדירות הקרינה הא"מ ו- $h$  הוא קבוע הנקרא "קבוע פלנק" ( $h$ ) הינו אחד הקבועים החשובים ביותר בפיסיקה המודרנית). מאחר ולגודל  $h\nu$  יחידות של אנרגיה ולתדירות יחידות של  $1/\text{sec}$ , לכן יחידות של  $h$  הינן  $\text{Joule} \cdot \text{sec}$ , ערכו של  $h$  הינו:

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

לחלקיקים מהם מורכבת הקרינה הא"מ קוראים "פוטונים". באופן כללי, עוצמת הקרינה הפוגעת בשטח מסוים מוגדרת כ "כמות האנרגיה הפוגעת בשטח ביחידת זמן". במודל החלקיקי לכן, תהיה עוצמת הקרינה הפוגעת, פרופורציונאלית למספר הפוטונים הפוגעים בשטח ביחידת זמן, כשקבוע הפרופורציה הינו  $h\nu$ . אינשטיין הציע גם להניח כי, כאשר פוטון פוגע באלקטרון במתכת, הוא מוסר לאלקטרון את כל האנרגיה שלו שהינה  $h\nu$ .

במשך הזמן התגלו תופעות נוספות בפיסיקה שבהן הייתה מעורבת מסירת אנרגיה מקרינה א"מ לחומר, תופעות אלו מצאו את הסברן (המשכנע) רק באמצעות הנחות אלו של אינשטיין ולא ניתן היה להסבירן על פי תכונות הקרינה הא"מ כגל. קיום תופעות אלו חיזק מאוד את המודל המתאר את הגל כחלקיק כפי שהציע אינשטיין. חשוב לציין כי, הרעיון של הקרינה הא"מ כזרם של חלקיקים (פוטונים) איננו בא במקום התיאוריה הגלית (התיאוריה שלפיה הקרינה הא"מ מתפשטת כגל) אלא רק לצידו. בגלל העובדה שתופעות מסוימות בפיסיקה ניתן להסביר יפה על פי התיאוריה הגלית (וקשה להסביר על פי התיאוריה החלקיקית) ותופעות אחרות ניתן להסביר על פי התיאוריה החלקיקית (וקשה להסביר על פי התיאוריה הגלית), נוהגים לדבר על תכונת ה"דואליות" (גל-חלקיק) של הקרינה הא"מ.

נחזור לאפקט הפוטואלקטרי: אם נקבל את המודל החלקיקי של אינשטיין, נוכל להסיק כי, את האנרגיה לאלקטרונים במתכת מספקים הפוטונים, כל פוטון מוסר את האנרגיה שלו כולה לאלקטרון אחד. האלקטרונים נמצאים ברמות אנרגיה שונות בחומר, לאלקטרונים הנמצאים ברמת אנרגיה הגבוהה ביותר באטום דרושה אנרגיה בשיעור  $\phi$  (קרויה "פונקצית העבודה"). אם פוגע פוטון באלקטרון כזה אזי הוא

מוסר לו אנרגיה בשיעור  $E_p = h\nu$ , ואם  $E_p > \phi$  הרי  $E_p - \phi > 0$  ולכן אחרי שישתחרר האלקטרון מפני המתכת תהיה לו אנרגיה קינטית  $E_{Kmax} = E_p - \phi$ , כאשר

$$(1) \quad E_{Kmax} = E_p - \phi_c = h\nu - \phi_c = \frac{hc}{\lambda} - \phi_c$$

משוואה (1) נקראת "המשוואה הפוטואלקטרית של איינשטיין".  
כאשר פוטון פוגע באלקטרון הנמצא ברמת אנרגיה נמוכה יותר, יותר אנרגיה תושקע בהוצאת האלקטרון והוא יישאר עם אנרגיה קינטית קטנה מ- $E_{Kmax}$ .

נבדוק עתה איך מסבירה משוואה זאת, בצירוף המודל החלקיקי של איינשטיין את תוצאות הניסויים 1 עד 4:

1. רק כאשר תדירות האור הפוגע  $\nu$  מקיים  $h\nu = \phi_c$  יתחילו להשתחרר אלקטרונים מפני המתכת (ערך זה הוא תדירות הסף). אולם האנרגיה הקינטית שלהם קטנה מכדי לגרום להם לנוע לכיוון כלשהו. הגדלת התדירות  $\nu$  מעל תדירות הסף ( $h\nu > h\nu_0$ ) תגרום לכך שאלקטרונים שיפלטו יהיו עם אנרגיה קינטית כך שבנוסף לכך שהם נפלטו מהמתכת יוכלו לנוע לעבר האנודה. לחלק מאלקטרונים הנפלטים מהקתודה יש אנרגיה קינטית מקסימלית הנתונה ע"י משוואה (1).

2. חיבור של מתח שלילי לשפופרת (האנודה שלילית ביחס לקתודה) גורם לדחיית האלקטרונים בחזרה לקתודה, מתחת לסף מסוים, לא יצליח אף אלקטרון להתגבר עליו ולהגיע לאנודה מתח זה הינו מתח העצירה. מאידך חיבור של מתח חיובי יגרום לאיסוף של האלקטרונים הנפלטים כך שמספר האלקטרונים שהאנודה אוספת ביחדת זמן הולך וגדל עם  $V$  עד שמגיעים למתח  $V_1$ , במתח זה האנודה אוספת בכל יחידת זמן את כל האלקטרונים הנפלטים (נזכור כי עוצמת הקרינה קבועה בחלק זה של הניסוי), זרם זה נקרא "זרם הרוויה".

הגרפים המתוארים באיור 4 מוסברים אף הם ע"י התיאוריה הנ"ל. עבור פוטוקתודה נתונה החל מתדירות סף  $\nu_0$  מתחילה פליטה, ואחר כך האנרגיה  $E_{Kmax}$  פרופורציונאלית ל-  $\nu - \nu_0$  (נובע מהמשוואה הפוטואלקטרית) לכן התיאור הינו קו ישר. מהמשוואה זו ברור גם כי השיפוע ( $\tan \alpha$ ) של כל הקווים קבוע ושווה ל-  $h \cdot e$ .

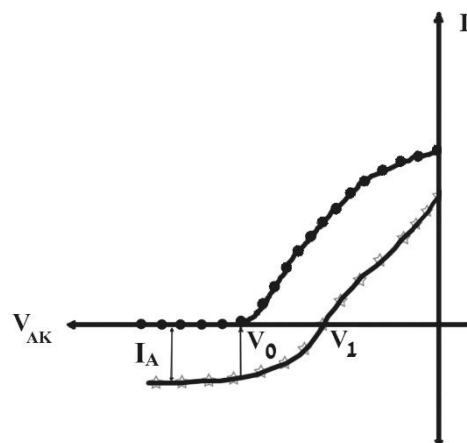


3. על פי המודל החלקיקי עוצמת ההקרנה על הקתודה הנה כמות האנרגיה הפוגעת בשטח הקתודה ביחידת זמן. מאחר והאנרגיה של כל פוטון הנה  $h\nu$  הרי עוצמת ההקרנה פרופורציונאלית למספר החלקיקים הפוגעים בשטח הקתודה ביחידת זמן (מקדם הפרופורציה הינו  $h\nu$ ), עבור עוצמת הקרנה מסוימת  $P_0$  מספר הפוטואלקטרונים הנפלטים מהקתודה בשנייה הינו  $N_0$  איננו בהכרח שווה למספר הפוטונים שפוגע בשטח הקתודה בשנייה) אם נקרין בעוצמה  $2P_0$  יפלטו  $2N_0$  אלקטרונים ביחידת זמן.

4. תופעה זאת ניתן להסביר ע"י ההנחה שמסירת האנרגיה מהפוטון לאלקטרון הינה מידית.

### 2.3 זרם אנודי וזרם קתודי

כאשר האור פוגע בשפופרת הפוטואלקטרית הוא פוגע הן על האנודה והן על הקתודה, כך ששניהם למעשה משתתפים באפקט וכל אחד מהם מספק זרם האופייני לו. באופן מעשי לא ניתן להפריד בין הזרם הקתודי (שכיוונו מהקתודה לאנודה) לבין הזרם האנודי (שכיוונו מהאנודה לקתודה) או למדוד רק אחד מהם, אנו מודדים זרם אחד במעגל שהוא סכום (כל זרם בכיוונו) של הזרמים. בשפופרת בה האנודה פעילה בפליטת האלקטרונים (דבר שיכול לקרות בדרך כלל באורכי גל קצרים), אז בנקודת איפוס הזרם (מתח העצירה) אנו מאפסים את הזרם הכללי כלומר את ההפרש בין הזרם הקתודי לאנודי.



איור 7: אופיין מתח-זרם אחורי של שפופרת בעלת אנודה פעילה

אם נבצע את הניסוי במצב בו הזרם האנודי הוא משמעותי נקבל גרף שבו הזרם מגיע לרוויה אחורנית עבור מתחים שלילים גדולים מספיק, את האופיין ניתן לראות

באיור 7 (הגרף התחתון עם הכוכביות). עבור המתח  $V_{AK}$  החיובי צורת הגרף דומה לזה המתוארת באיור 3. כפי שניתן לראות בגרף עבור המתח ההופכי (השלילי) מקבלים "זרם שלילי" החל מ- $V_1$ . תוצאה זו נובעת מכך כי עבור  $V_{AK} < 0$  הקתודה חיובית ביחס לאנודה והאלקטרונים שנפלטו מהאנודה יזרמו לקתודה. בזרם הרוויה האחורי האלקטרונים הנפלטים מהקתודה יעצרו על ידי המתח ההפוך כך שהזרם במצב זה הוא למעשה איסוף של כל האלקטרונים הנפלטים מהאנודה כלומר  $I_{anode} = const$ , כאשר הגרף עם הנקודות מיצג מצב ללא זרם אנודי.

$$I = |I_{cathode}| - |I_{anode}| \text{ יהיה במעגל יהיה}$$

כלומר, עבור מצב רוויה במתח חיובי נקבל איסוף של כל האלקטרונים הנפלטים מהקתודה ואילו האלקטרונים הנפלטים מאנודה יבלמו. עבור הזרם הרוויה האחורי (מתח שלילי) נקבל מצב הפוך בו כל האלקטרונים מהקתודה יעצרו ואילו האלקטרונים הנפלטים מאנודה יאספו.

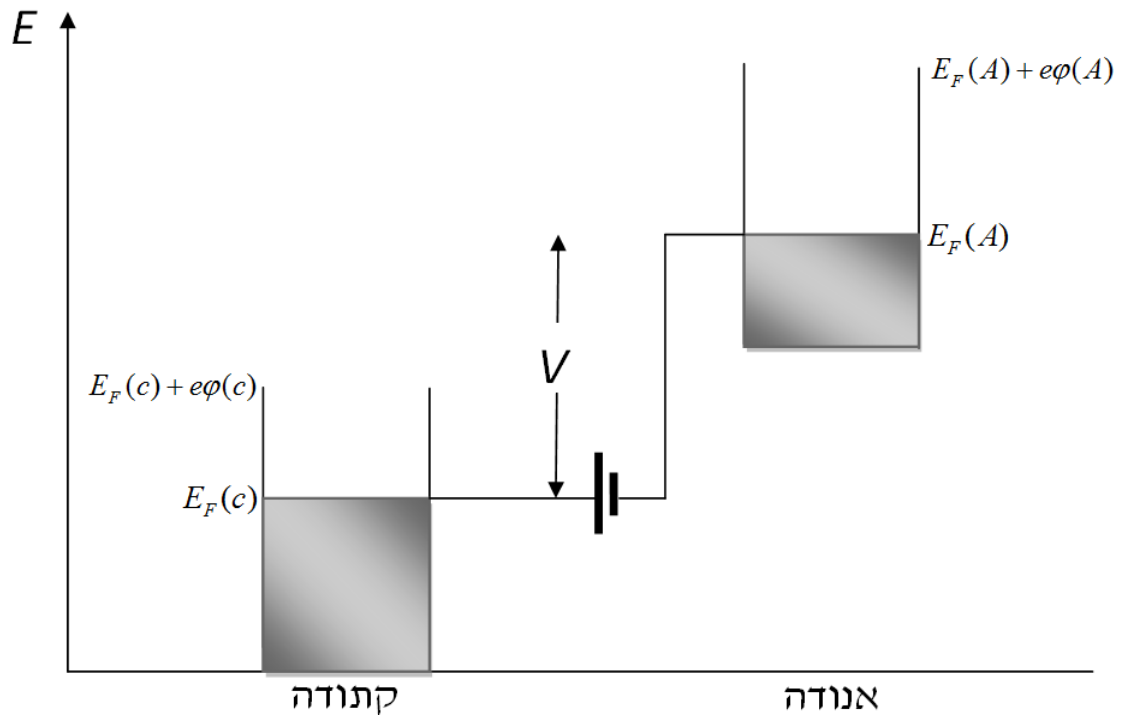
באופן מעשי הזרם האנודי קטן בהרבה מזרם הקתודה וזאת בשל צורתה הגיאומטרית (גודלה של הקתודה גדול בהרבה משל האנודה) וכן אנו דואגים כי עיקר האור הפוגע יפגע בקתודה ולא באנודה כך שיעילות הפליטה של קתודה גבוהה בהרבה מזו של האנודה.

#### **2.4 פוטנציאל המגע בין האנודה והקתודה בשפופרת פוטאלקטרית**

האנרגיה הגבוהה ביותר שבה נמצאים אלקטרונים במתכת נקראת רמת פרמי. במערכת הניסוי מובאים האנודה והקתודה לכדי מגע בניהם כאשר המתח  $V$  מופעל בניהם ע"י סוללה, תיאור של מצב אנרגטי זה ניתן לראות באיור 8.

נסמן את רמת פרמי של האנודה והקתודה ב  $E_F(A)$  ו  $E_F(C)$  בהתאמה. המתח  $V$  שאנו מפעילים בין האנודה לקתודה יוצר הפרש פוטנציאלים  $eV$  בין רמת פרמי בקתודה לרמת פרמי באנודה (ראה איור 8). הפרש הפוטנציאלים בין רמות פרמי של הקתודה והאנודה (ללא המתח) הוא  $E_F(A) - E_F(C)$ . אם נוסיף מתח חיצוני ביניהם האנרגיה הקינטית שתהיה לאלקטרונים למעבר בין הקתודה לאנודה היא:

$$(2) \quad E_K = eV + [E_F(A) - E_F(C)]$$



איור 8: רמות אנרגיה של קתודה ואנודה בממתח שלילי

ה"מתח העוצר"  $V_0$  הינו המתח הגבולי בין האנודה לקתודה שעבורו האלקטרונים בעלי  $E_{Kmax}$  אינם בעלי אנרגיה מספיקה על מנת להגיע לאנודה. לכן מתוך משוואות (1),(2) ניתן לרשום:

$$(3) \quad eV + [E_F(A) - E_F(C)] = h\nu - E_F(C)$$

נסמן את מתח העצירה ב  $V_0$  ואת פונקציית העבודה של האנודה ב- $\phi_A$ . לאחר הצמצום, משוואה (3) תירשם כך:

$$(4) \quad eV_0 = h\nu - \phi_A$$

ולכן זו המשוואה הפוטואלקטרית המתארת את המערכת הניסיונית שבה אנו דנים. יוצא אם כך שבניסוי נמדדת פונקציית העבודה של האנודה.

## 2.5 פוטודיודה

האפקט הפוטואלקטרי נוצל במשך השנים לצורך שימושים רבים במדע ובטכנולוגיה, השימושים הנפוצים ביותר הם לצורך גילוי אור והפקת חשמל מאור כאשר הרכיב השימושי ביותר למטרות אלו היא הפוטודיודה.

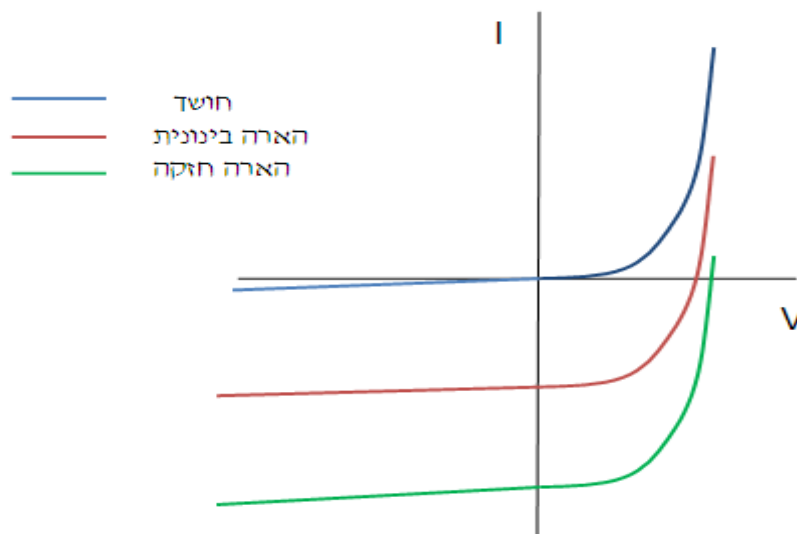
הפוטודיודה היא למעשה דיודה הבנויה מחומרים מיוחדים המשחררים אלקטרונים ביעילות גבוהה כתוצאה מפגיעת פוטונים. דיודה מורכבת מצומת של שני מוליכים למחצה, ישנו פער בין רמות האנרגיה של האלקטרונים משני עברי הצומת, פער זה גורם לאלקטרונים המשחררים להמשך לצד אחד של הצומת (למוליך למחצה מסוג N) ובכך נוצר זרם הפרופוזיונלי להארה.

הסבר מקיף של פעולת הפוטודיודה מצריך ידע נרחב במוליכים למחצה ולא ניכנס לכך במיסגרת תדריך זה.

באיור 9 ניתן לראות את השינוי באופן מתח זרם של הפוטודיודה כתוצאה מהארה על הפוטודיודה, ניתן לראות שהאופיין הוא אופיין טיפוסי של דיודה הניתן במשוואה (5) המוזז על הציר האנכי כתוצאה של תוספת הזרם הנובעת מפגיעת הפוטונים.

$$(5) \quad I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV_D}{\eta kT}\right) - 1 \right]$$

כאשר המתח על הדיודה שלילי הזרם נקרא "זרם זליגה" והוא מסדר גודל של ננו-אמפרים בודדים, זאת לעומת הזרם שנוצר מהארת הפוטודיודה שיכול להגיע למאות מיקרו-אמפרים כך שניתן להתייחס לזרם כאילו נוצר כולו עקב ההארה, מהסיבה הזאת אופן השימוש בפוטודיודה כגלאי אור הוא בממתח אחורי.

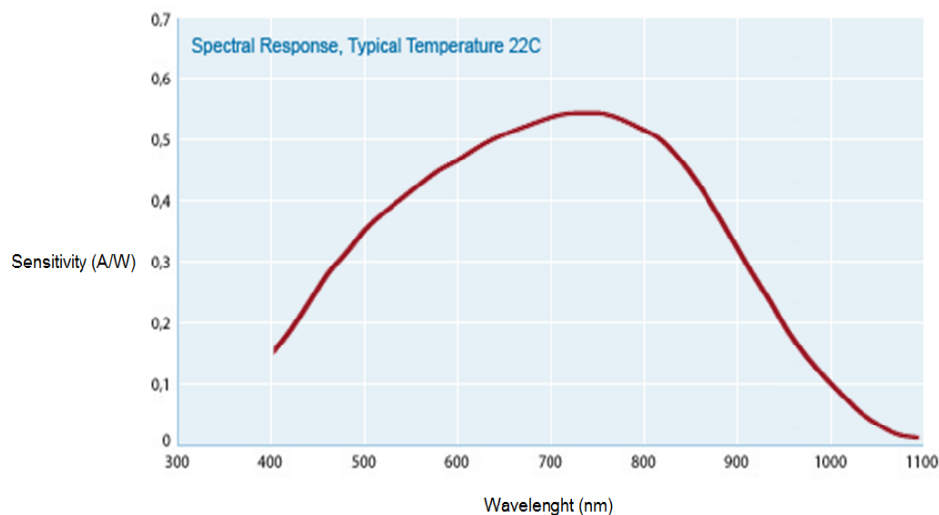


איור 9: אופיין מתח-זרם של פוטודיודה תחת הארה

הזרם הנוצר בפוטודיודה תלוי גם באורך הגל הפוגע, התלות מוגדרת באמצעות תגובתיות (Responsivity) הפוטודיודה שהיא היחס בין הזרם הנוצר מהספק באורך גל מסוים הפוגע בפוטודיודה, להספק הפוגע.

$$(6) \quad R(\lambda) = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{I}{P}$$

כאשר  $\eta$  הוא היחס בין מספר הפוטואלקטרונים למספר הפוטונים שפגעו בפוטודיודה, התגובתיות מאפינת את הטווח הספקטראלי שעבורו גילוי האור יעיל, אשר מוגבל על ידי תדירות הסף - תדירות שבה אנרגיית הפוטונים קטנה מפונקציית העבודה של הפוטודיודה.



**איור 10:** התגובה הספקטראלית של הפוטודיודה שבה נשתמש בניסוי

## **2.6 התאבכות אלקטרונים**

בשנת 1923 טען לואי דה ברויי כי אם לגלים יש תכונות חלקיקיות הרי הגיוני שלחלקיקים יהיו תכונות גליות וניסח את [השערת דה ברויי](#) ולפיה ניתן ליחס לחלקיק אורך גל לפי הנוסחה:

$$(7) \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

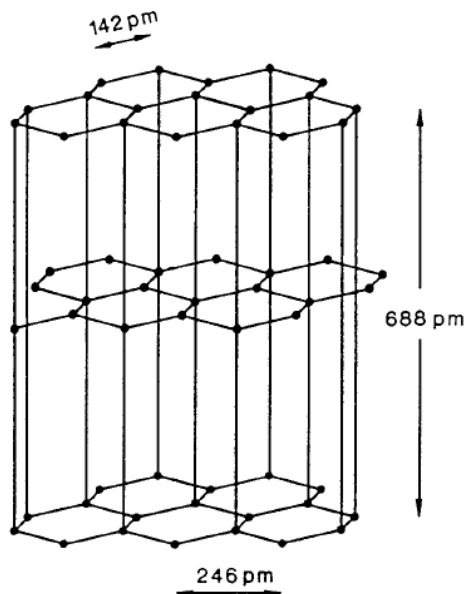
כאשר  $\lambda$  הוא אורך הגל,  $h$  קבוע פלנק ו-  $p$  התנע של האלקטרון.

את האופי גלי של האלקטרון ניתן לראות במידה ומכוונים אלומה של אלקטרונים לעבר שכבה דקה מאוד של גרפיט. במידה והאלקטרונים יתנהגו כמו חלקיקים נצפה שפיזור האלקטרונים לאחר המעבר בגרפיט יהיה אחיד או גאוסיני ללא תלות מובהקת באנרגית האלקטרונים.

במידה והאלקטרונים יתנהגו כגלים כל אטום בגביש יצור פיזור של הגל, כלומר ישמש כמקור גלים נקודתי, ומכיוון שהאטומים מסודרים במרחקים שווים (איור 11), יוצר בין הגלים התאבכויות בונות והורסות כתלות בזווית הפיזור, כך שלמעשה הגביש ישמש כסריג התאבכות תלת מימדי, והאלקטרונים יפלטו בזוויות מסוימות המוגדרות לפי התנאי להתאבכות בונה:

$$(8) \quad d \sin(\alpha) = n\lambda$$

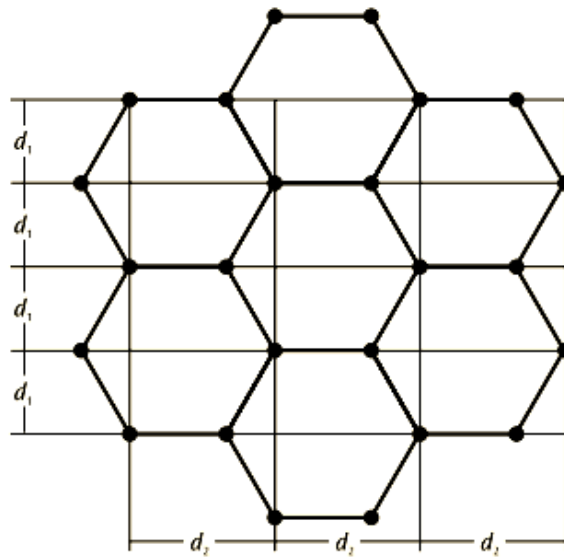
כאשר  $\alpha$  היא זווית הפיזור ביחס לניצב למשטח,  $d$  המרווח בין המישורים בסריג (בהתאמה למרחק בין סדקים בסריג),  $\lambda$  אורך גל דה ברויי של האלקטרון ו- $n$  הוא סדר ההתאבכות.



איור 11: קבועי הסריג של גרפיט

בפועל ישנן מספר מישורים בגרפיט שיוצרים התאבכות בונה (איור 12) ובניסוי מתקבלים תוצאות עבור שני ערכי  $d$  שונים. כמו כן הגביש היינו רב גביש, כלומר מורכב מגבישונים שכל אחד מהם מוּזז מעט ביחס לשאר (אך כולם סימטריים ביחס

לקרן הפוגעת) וכך מתקבל פיזור של האלקטרונים כקונוסים במקום פיזור בקרניים בודדות כמו בסריג חד מימדי.



איור 12: שני מישורי ההתאבכות הראשונים של הגרפיט

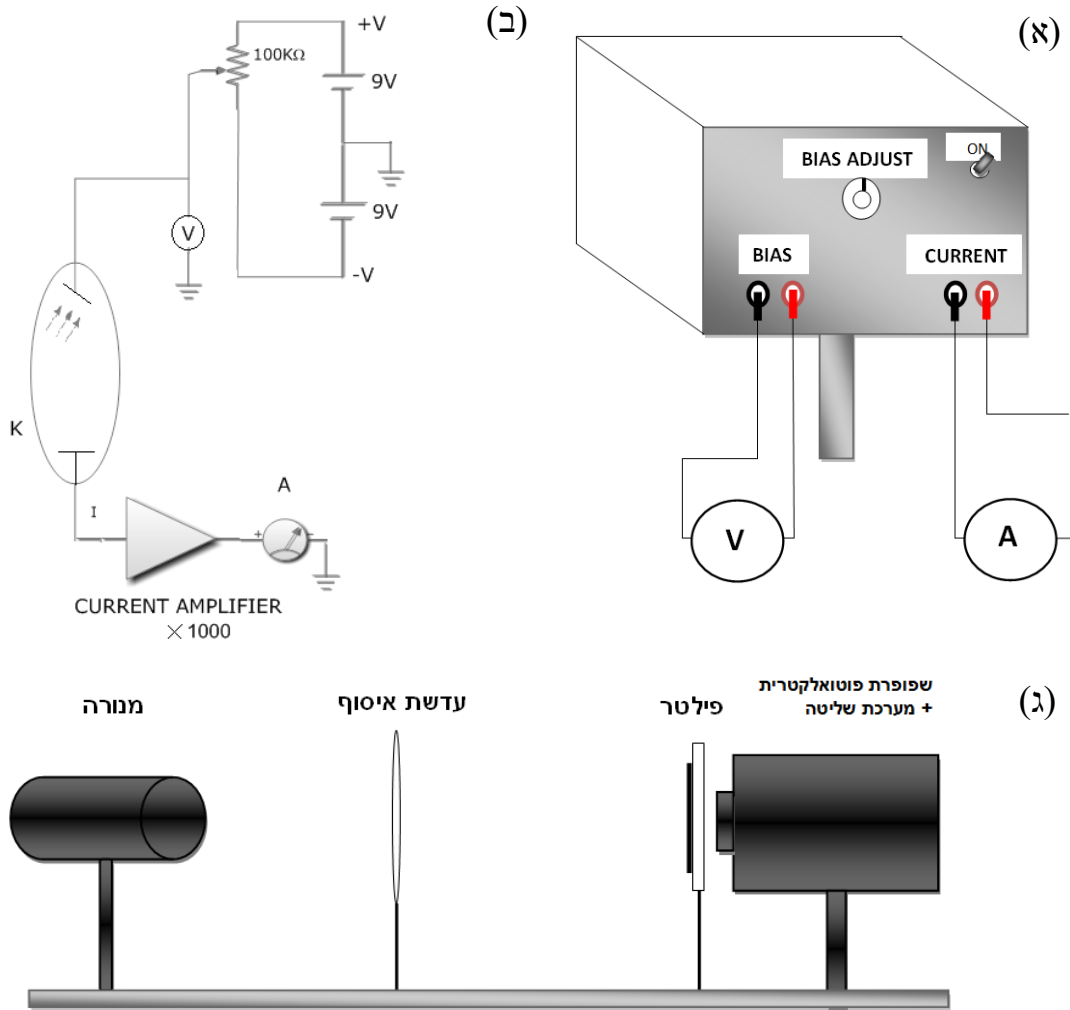
### 3. מהלך הניסוי

השפופרת הפוטואלקטרית בניסוי זה מונחת בתוך קופסת שליטה שדרכה ניתן לשנות את המתח בין האנודה לקתודה. לצורך קריאת המתח והזרם בין האנודה לקתודה יש לחבר מד-מתח ומד-זרם חיצוניים לקופסת השליטה כמוראה באיור 13(א). צמוד לפתח כניסת האור אל השפופרת הפוטואלקטרית יש להניח פילטר שתפקידו לסנן את תחום אורכי הגל הפוגע בשפופרת [איור 13(ג)], הפילטרים חוסמים אורכי גל הקטנים מאורך הגל המצוין עליהם.

מקור האור בניסוי הוא מנורת להט המופעלת באמצעות ספק מתח ישר, האור מרוכז לעבר השפופרת באמצעות עדשת איסוף [איור 13(ג)], יש לכוון את המערכת באופן שבו מקסימום הארה תגיע לשפופרת.

### דגשים:

- הפעל את המנורה במתח של עד 5.5 וולט לאורך כל הניסוי, אל תעבור מתח זה !
- זרם אופייני בין הקתודה לאנודה הנמדד באמפרמטר הוא בסדר גודל של מילי-אמפר (לאחר הגבר פנימי קבוע  $\times 1000$  בקופסת השליטה), מצא סקאלת מדידה מתאימה באמפרמטר עבור זרם זה.



איור 13: (א) אופן העבודה עם מערכת השליטה, (ב) תרשים סכמתי של המערכת בניסוי ו-(ג) מבנה אופייני למערכת הניסוי

### 3.1 תלות הזרם בין האנודה לקתודה במתח $V_{AK}$

תחילה נאפיין את השפופרת הפוטואלקטרית ע"י שרטוט עקומת זרם-מתח של מערכת הניסוי. חבר את המערכת לפי מתואר באיור 13. בחר אחד מהפילטרים הנתונים לך רשום את ערכו והנח אותו במעמד הפילטרים [ראה איור 13(ג)]. שנה את המתח  $V_{AK}$ , באמצעות כפתור BIAS ADJUST הנמצא מאחורי קופסת השליטה, ממתח 8V עד -2V ועבור כל ערך של  $V_{AK}$  רשום את הזרם הנוצר בשפופרת הפוטואלקטרית. מדוד לפחות 20 מדידות ובעיקר סביב מתח העצירה (המתח שעבורו הזרם מתאפס). רשום גם את מתח העצירה, הקפד במיוחד לדייק במדידת ערך זה. חזור על התהליך עבור 3 פילטרים נוספים. הצג את התוצאות בגרפים ובצע דיון בתוצאות.



### 3.2 מציאת פונקציית העבודה וקבוע פלנק

השתמש בערכי מתח העצירה שמצאת בניסוי הקודם והשלם את המדידות הנדרשות עבור הפילטרים הנותרים (8 פילטרים).

שרטט גרף של מתחי עצירה כפונקציה של  $1/\lambda_{\min}$ , הסבר את הגרף ונתח את השגיאות. מתוך תוצאותיך מצא את פונקציית העבודה של האנודה, את קבוע פלנק ואת אורך גל הסף  $\lambda_{\text{cutoff}}$  (אורך הגל המקסימאלי הגורם לפלטת אלקטרונים מהקתודה).

ציין את המיקום של  $1/\lambda_{\text{cutoff}}$  ושל פונקציית העבודה על הגרף, והשווה את הערך של קבוע פלנק שקיבלת לספרות, הערך את השגיאה ובצע דיון בתוצאות.

### 3.3 תלות הזרם הפוטואלקטרי בעוצמת ההארה

הצב את שני המקטבים (מקטב קבוע ומקטב משתנה) בין עדשת האיסוף לשפופרת וכוון אותם כך שהזווית בין הצירים שלהם תהיה  $0^\circ$  (עוצמה מקסימלית). כוון את  $V_{AK}$  ל  $3V$  והנח את אחד מהפילטרים במעמד (ציין את אורך הגל שלו).

שנה את עוצמת האור הפוגע בשפופרת באמצעות שינויים בזווית בין המקטבים בין  $0^\circ$  ל-  $90^\circ$  ורשום את הזרם הנמדד עבור כל עוצמה.

עוצמת האור ביציאת המקטב השני כתלות בזווית בין המקטבים נתונה ע"י:

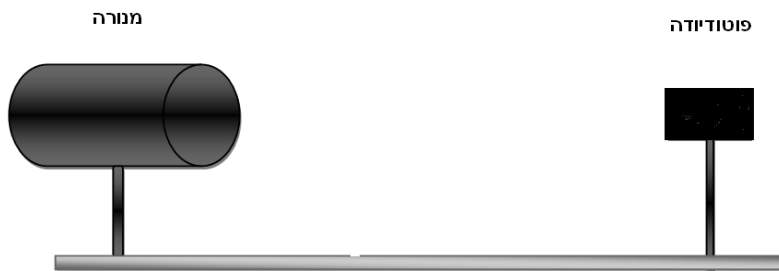
$$(9) \quad I = I_0 \cos^2 \theta$$

חזור על הפעולה עבור אורך גל נוסף, הצג את הגרף של הזרם כפונקציה של עוצמת ההארה, והסבר את התוצאות.

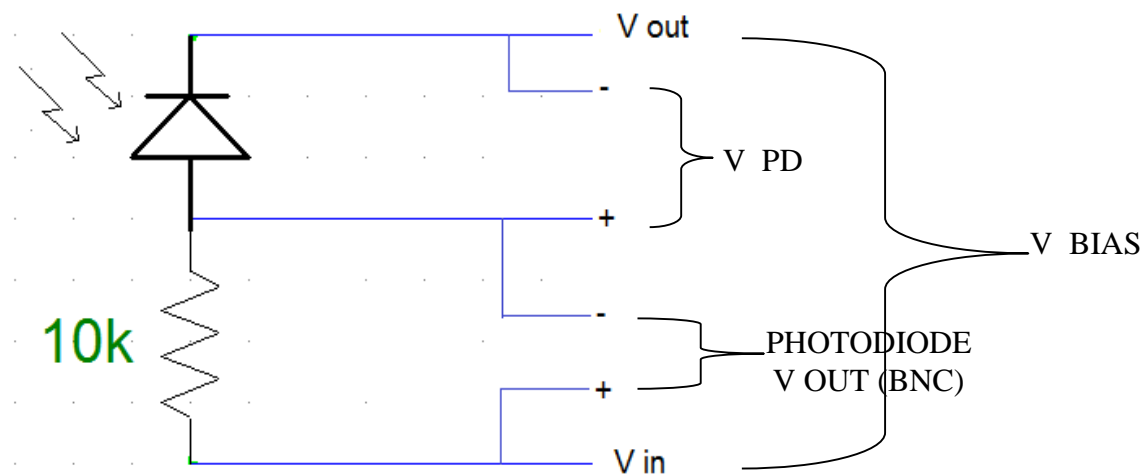
## פוטודיודה

### 3.4 קבלת עקומת זרם מתח של פוטודיודה

הרכב את מערכת הניסוי המתוארת באיור 14. המעגל החשמלי שבו מורכבת הפוטודיודה מתואר באיור 15, חבר את יציאת V BIAS (מתח הכניסה של המערכת) שעל הפוטודיודה ליציאת ה BIAS שמאחורי קופסת השליטה וחבר את יציאות PHOTODIODE OUT (המתח על נגד ההגנה, חיבור BNC) ויציאת V PD (מתח על הפוטודיודה) למדי מתח.



איור 14: מערכת הניסוי



איור 15: מעגל הגילוי

שנה את המתח על הדיודה בטווח של  $-3 < V < 0.6$ , ועבור כל ערך של מתח מצא את הזרם העובר בפוטודיודה, מציאת הזרם תעשה מתוך קריאת המתח הנופל על נגד ההגנה אשר ערכו ידוע.

שרטט את עקומת זרם-מתח של הפוטודיודה, חזור על התהליך במצב של חושך ועוצמות הארה שונות, בצע דיון בתוצאות.

מהו אזור העבודה המומלץ לעבודה עם הפוטודיודה כגלאי אור ומדוע?

**3.5 תלות הזרם בהארה**

בסעיף זה נשנה את עוצמת האור המגיע לפוטודיודה באמצעות שינוי המרחק של מקור האור מהפוטודיודה.

ההספק הפוגע בגלאי תלוי במרחק בין המנורה לגלאי, כאשר מתייחסים אל המקור כאל מקור נקודתי, הוא נתון ע"י חוק ריבוע המרחק :

$$(10) \quad I(L) = \frac{I_0}{L^2}$$

כאשר  $I(L)$  הספק ליחידת שטח המגיע לגלאי הנמצא במרחק  $L$  מהמקור,  $L$  המרחק בין המקור לגלאי,  $I_0$  הוא מקדם פרופורציה שתלוי בעוצמת המקור וגודל הגלאי.

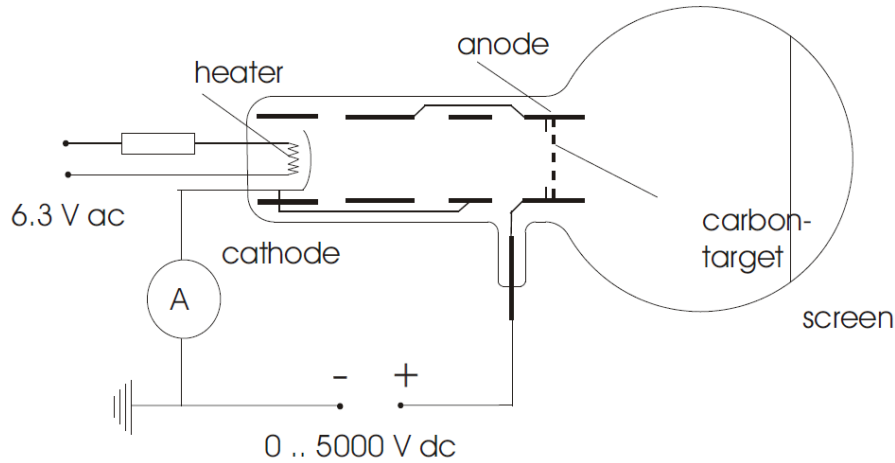
**מהלך הניסוי**

הפעל את הפוטודיודה כאשר היא מחוברת בממתח אחורי . שנה את מרחק המנורה מהפוטודיודה ועבור כל מרחק מדוד את הזרם בפוטודיודה, בצע מדידות בטווח בין 15 ל- 50 ס"מ ובהפרשים של 5 ס"מ. קבל את גרף הזרם כתלות בהארה, ודון בתוצאות.

זכרו לכבות את קופסת השליטה בתום הניסוי !

### 3.6 התאבכות אלקטרוניים

השפופרת שבה נשתמש בניסוי מורכבת מקתודה שפולטת אלקטרוניים עקב חימום ממקור מתח חילופין  $6.3V$ , אנודה שמאיצה את האלקטרוניים הנפלטים לעבר מטרת גרפיט, ולאחר מטרת הגרפיט האלקטרוניים המפוזרים ממשיכים לעבר מסך פלורוסנטי שבעזרתו ניתן למדוד את מקום פגיעת האלקטרוניים (איור 16).



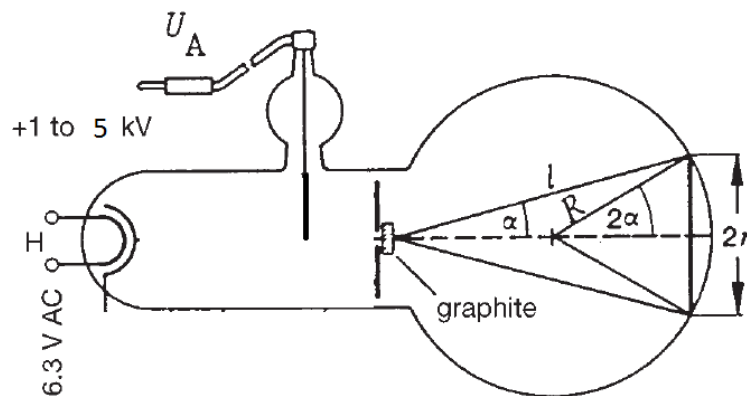
איור 16: תאור סכמתי של מערך הניסוי

את התנע של האלקטרוניים ניתן למצוא לפי מתח ההאצה

$$(10) \quad \frac{p^2}{2m} = \frac{1}{2}mv^2 = eV_a$$

ולפי משוואות (7) ו (10) ניתן לכתוב את אורך הגל כ:

$$(11) \quad \lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV_a}}$$



איור 17: חישוב זווית הפיזור

השפופרת בנויה כך שמטרת הגרפיט ממוקמת כביכול על היקף המעגל (איור 17) ולכן את זווית הפיזור  $\alpha$  ניתן לחשב בעזרת המשפט הגאומטרי "זווית היקפית שווה בגודלה למחצית הזווית המרכזית הנשענת על אותה קשת".

$$(12) \quad \sin(2\alpha) = \frac{r}{R}$$

כאשר  $R = 65 \text{ mm}$ .

נשתמש בזהות  $\sin(2\alpha) = 2 \sin(\alpha) \cos(\alpha)$  כאשר עבור זוויות קטנות ( $\cos(10) = 0.985$ ) ניתן לכתוב  $\sin(2\alpha) = 2 \sin(\alpha)$ . בעזרת הקירוב הנ"ל ו משוואה (8) ניתן להגיע לביטוי

$$(13) \quad r = \frac{2R}{d} n\lambda$$

שבו ניתן להצביע על תלות ליניארית בין אורך הגל [המחושב לפי משוואה (11)] לבין רדיוס טבעת ההתאבכות, כאשר שיפוע הגרף תלוי ב-  $d$ .

### 3.6.1 מהלך הניסוי

הפעל מתח חילופין של 6V על הקתודה בעזרת הספק היעודי. הפעל את ספק המתח הגבוה והעלה את המתח באיטיות עד שניתן יהיה לראות את טבעות ההתאבכות. בדוק באיזה טווח של המתח הגבוה ניתן לראות את הטבעות ומדוד כ-8 מדידות של רדיוס הטבעות והמתח המופעל (כדי למדוד את רדיוס הטבעת מדוד בעזרת קליפר דיגיטאלי את הקוטר החיצוני והפנימי של כל טבעת וחשב ממוצע). שימו לב! שתי הטבעות אינם הסדר הראשון והשני של ההתאבכות אלא הסדר השני של שתי מחזוריות שונות בגביש  $(d_1, d_2)$ .

### 3.6.2 עיבוד תוצאות

המר את המתחים שעבורם ביצעת מדידות לאורכי גל ושרטט גרף של רדיוס הטבעת כתלות באורך הגל עבור שתי הטבעות.

מצא את שיפועי הגרפים, ובעזרתם מצא את  $d_1, d_2$ .

בחן את התוצאות למול הנתונים מהספרות:  $d_1 = 211 \text{ pm}$ ,  $d_2 = 123 \text{ pm}$ .