

האפקט הפוטואלקטרי

מילות מפתח:

פוטונים, פונקצית עבודה, תדירות סף, מתח עצירה, קבוע פלנק

הציוד הדרוש: מתקן הכולל מנורת להט, ספק, ערכה הכוללת שפופרת פוטואלקטרית, מולטימטר, 4 פילטרים, מגבר זרם, ספק מתח משתנה.

מטרות הניסוי:

- להכיר את תופעת האפקט הפוטואלקטרי.
- למדוד את קבוע פלנק.

1. תיאוריה

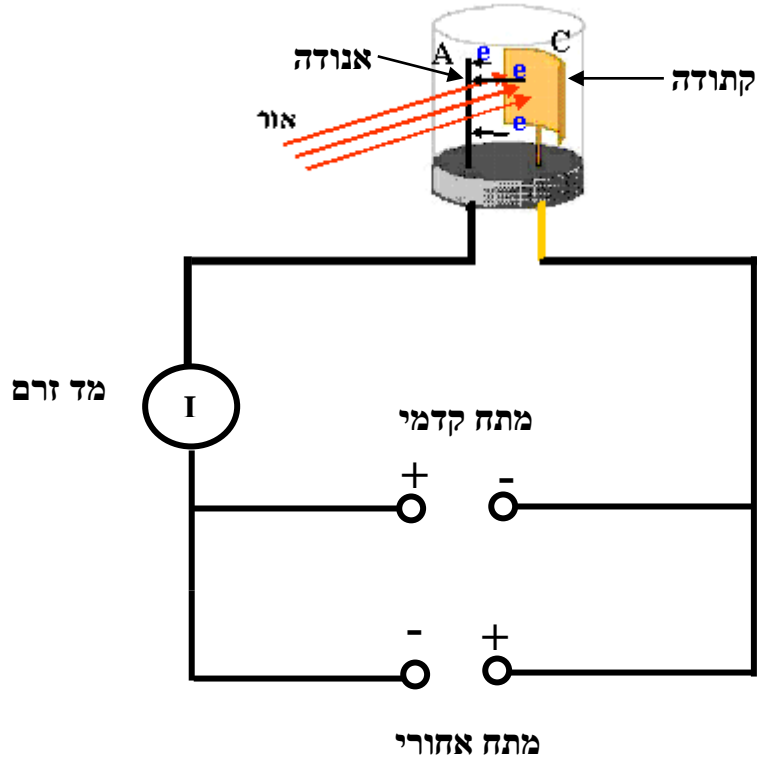
1.1 האפקט הפוטואלקטרי

האפקט הפוטואלקטרי הינו אחד הניסויים שהובילו להתפתחותה של תורת הקוונטים. באפקט הפוטואלקטרי ישנן מספר תופעות שאינן ניתנות להסבר באמצעות הפיסיקה הקלאסית ומצריכות הסבר חדש, הסבר כזה ניתן ע"י אלברט איינשטיין בשנת 1905 וזיכה אותו בפרס נובל.

התופעה באופן עקרוני, כאשר אור פוגע במתכת, האנרגיה שנושא האור גורמת לפליטת אלקטרונים מפני המתכת. על מנת לבחון את האפקט נשתמש במערכת המתוארת באיור 1 (תא פוטואלקטרי). האור הפוגע בקתודה גורם לפליטת אלקטרונים מפני החומר, אלקטרונים אלו נפלטים עם אנרגיה קינטית מסוימת וחלקם מגיעים אל האנודה וזורם זרם במעגל. אם מפעילים מתח קדמי (האנודה חיובית ביחס לקתודה), המתח יאיץ את האלקטרונים לכוון האנודה והזרם במעגל יגדל. אם מפעילים מתח הפוך או מתח מעכב (האנודה שלילית ביחס לקתודה), המתח יתנגד לזרימת האלקטרונים לכוון האנודה והזרם במעגל יקטן. מסתבר שישנן מספר תופעות בניסוי זה הדורשות הסבר וחלקם אינן ניתנות להסבר על פי התיאוריה הקלאסית של האור כגל אלקטרומגנטי, אלא בהתייחסות לאור כאוסף חלקיקים (פוטונים).

על מנת להסביר את התופעה, נציג מספר מושגים הקשורים לניסוי זה וקושי להסביר זאת בדרך הקלאסית של האור כגל אלקטרומגנטי.

-האפקט הפוטואלקטרי-



איור 1: סכימה של מערכת למדידת האפקט הפוטואלקטרי.

א. תדירות הסף: מסתבר שפליטת האלקטרונים מתרחשת במתכת נתונה אך ורק אם תדירות הגל הפוגע גדולה מתדירות סף אופיינית למתכת, ואילו בתדרים נמוכים מתדירות הסף לא מתרחשת פליטה כלל אפילו אם נגדיל את עוצמת המקור. תופעה זו אינה ניתנת להסבר בתיאוריה הקלאסית שבה העברת האנרגיה ע"י הגל אינה תלויה בתדירות.

ב. זמן תגובה: זהו הזמן שעובר מרגע ההקרנה על הקתודה עד להופעת זרם במעגל. לפי התאוריה הקלאסית, זמן התגובה לקתודה הוא מסדר גודל של שניות בעוד שבניסוי זמן התגובה אפסי.

ג. מתח עצירה: זהו המתח ההופכי הדרוש לבלום את כל האלקטרונים שנפלטו מהקתודה. לאלקטרונים הנפלטים ישנה אנרגיה קינטית אשר יכולה להיות גדולה מאד, ולכן אנו מצפים שגם אם המתח המעכב יהיה גדול עדיין יזרום זרם קטן במעגל. בפועל, לכל תדר ישנו מתח מעכב אשר עוצר את האלקטרונים לחלוטין ללא תלות בעוצמת האור, מתח זה נקרא "מתח העצירה". תופעה זו מצביעה על כך שלאלקטרונים הנפלטים ישנה אנרגיה קינטית מקסימלית שאינה תלויה בעוצמת האור ולכן מתח מעכב יכול לעצור את הזרם.

-האפקט הפוטואלקטרי-

ההסבר של איינשטיין לאפקט הפוטואלקטרי טוען שלאור, יש תכונה של דואליות לעיתים התנהגות האור כגל אלקטרומגנטי ולעיתים כחלקיק. בניסוי זה מתגלה האור בצורתו החלקיקית. חלקיק האור נקרא בשם פוטון, ולכל פוטון יש אנרגיה E פרופורציונית לתדר ν של גל האור לפי הקשר:

$$(1) \quad E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

כאשר קבוע הפרופורציה h נקרא קבוע פלנק והוא אחד מקבועי הטבע הבסיסיים, ערכו הוא: $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

יש מספר עקרונות שמתקיימים בניסוי של האפקט הפוטואלקטרי והן:

- לכל מתכת יש סף אנרגיה מנימלי מסוים שרק מעל ערך זה ישתחררו אלקטרונים ממנה. אנרגיה זו נקראת פונקצית העבודה Φ של מתכת הקתודה והיא תלויה רק בסוג המתכת ממנה עשויה הקתודה. לכן, כדי לגרום לפליטת אלקטרונים דרוש גם סף אנרגיה מנימלי של האור הפוגע (הפוטון) שיהיה גדול מפונקצית העבודה של המתכת.

- העברת האנרגיה מהאור לאלקטרון נעשית בד"כ ע"י פוטון יחיד. כלומר האנרגיה שמקבל האלקטרון שווה לאנרגיה של פוטון יחיד. כאשר מתייחסים לאור כאל שטף של פוטונים, ניתן להבין את התופעות האלה:

א. תדירות הסף: האנרגיה שמקבל האלקטרון היא אנרגית פוטון $h\nu$. על מנת שהאלקטרון ישתחרר מהמתכת יש צורך להתגבר על פונקצית העבודה של המתכת, ולכן אנרגית הפוטון צריכה להיות גדולה או שווה לפונקצית העבודה:

$$(2) \quad h\nu \geq \Phi$$

משוואה (2) מגדירה את תדירות הסף: $\nu_0 = \frac{\Phi}{h}$. אם תדירות האור הפוגע קטנה

מתדירות הסף $\nu < \nu_0$, אנרגיית פוטון יחיד אינה מספיקה על מנת לשחרר

אלקטרון מהקתודה ולכן אלקטרונים לא נפלטים כלל ואין זרם במעגל.

ב. זמן תגובה: האפקט הפוטואלקטרי מתרחש כתוצאה מהתנגשות של פוטון עם אלקטרון, בליעת הפוטון והעברת אנרגיה לאלקטרון. זמן ההתנגשות הוא קטן מאד וכמעט אפסי.

-האפקט הפוטואלקטרי-

ג. מתח עצירה- כאמור, אלקטרון מקבל את האנרגיה של פוטון יחיד, ועליו להתגבר על פונקציית העבודה. לכן, האנרגיה הקינטית המקסימלית של אלקטרון הנפלט מהקתודה היא:

$$(3) \quad K_{\max} = h\nu - \Phi = \frac{hc}{\lambda} - \Phi$$

אם נשים מתח אחורי V , רק אלקטרונים שלהם אנרגיה קינטית $K > eV$ יגיעו לאנודה. לכן אם המתח האחורי יהיה גדול מהאנרגיה הקינטית המקסימלית של אלקטרון, לא יהיה אלקטרון שיוכל להתגבר על המתח האחורי ולא יהיה זרם כלל. אם כן, מתח העצירה V_0 מוגדר ע"י:

$$(4) \quad eV_0 = h\nu - \Phi = \frac{hc}{\lambda} - \Phi$$

❖ נשים לב כי האנרגיה של הפוטון נקבעת רק לפי התדירות האור (או אורך הגל) ואין קשר לעוצמת האור הפוגע. לכן אם האנרגיה האור הפוגע איננה מספיקה להוצאת אלקטרונים הגדלת עוצמת האור לא תועיל במאומה להוצאת אלקטרונים. לעומת זאת, אם האנרגיה של הפוטון הפוגע גדולה מאנרגיה הסף יצאו אלקטרונים עם אנרגיה קינטית לפי ההפרש האנרגיות בנוסחה 4. הגדלת עוצמת האור הפוגע לא יגרום להגדלת האנרגיה הקינטית של האלקטרונים. (יפלטו יותר אלקטרונים, כלומר יותר זרם, אך האנרגיה המקסימלית של האלקטרונים תישאר כמקודם)

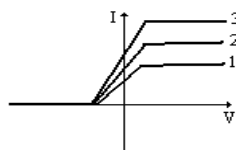
❖ סרטון הדגמה: https://www.youtube.com/watch?v=ubkNGwu_66s

1.2 עבודת הכנה

1. מהי האנרגיה של פוטון באורך גל 600 nm ביחידות של eV (אלקטרון-וולט)?

מהירות האור $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$, מטען האלקטרון $e = 1.6 \cdot 10^{-19} C (Coulomb)$.

2. בניסוי האפקט הפוטואלקטרי התקבלו האופיינים הבאים של הזרם בתלות במתח V .



הסבר מה קבוע ומה משתנה מאופיין לאופיין.

-האפקט הפוטואלקטרי-

3. בניסוי פוטואלקטרי התקבל מתח עצירה של 0.15 וולט עבור תא פוטואלקטרי שהקתודה עשויה מחומר אשר פונקצית העבודה שלה שווה 4 eV . מהי תדירות הסף של האור הפוגע ?

4. קבע אם המשפטים הבאים נכונים ונמק!

1. הגדלת פונקצית העבודה מקטינה את זרם הרוויה.

2. הגדלת עוצמת האור מגדילה את זרם הרוויה.

3. תדירות הסף תלויה בעוצמת האור הפוגע.

4. תדירות הסף תלויה בפונקצית העבודה.

2. מהלך הניסוי

2.1. תיאור הניסוי

מערכת הניסוי מורכבת משפופרת ריק בעלת חתך גלילי ובה קתודה בעלת שטח פנים גדול העשויה מצזיום אנטימוניד וחוט דק המשמש כאנודה. השפופרת נמצאת בתוך מיכל אטום ובו פתח דרכו נכנס האור, על השפופרת מודבק פס שחור המונע הגעת אור אל האנודה. מקור האור הוא מנורת טונגסטן המוזנת באמצעות שנאי. הזרם בין הקתודה והאנודה הינו קטן מאד (בסדר גודל של $1 \text{ nA} = 10^{-9} \text{ A}$) , לכן על מנת למדוד את הזרם באמצעות מד הזרם הנמצא ברשותנו, שהתחום הרגיש ביותר שלו הוא $200 \mu\text{A}$, נשתמש במגבר זרם בהגבר 1000. את המתח בין האנודה לקתודה נספק באמצעות ספק מתח ישר אשר מאפשר לשנות את המתח בתחום 18V ל-3V-. המערכת מתוארת באיור 2.

מערכת הניסוי כוללת גם ארבעה פילטרים (מסננים) אשר מסננים את האור. מסננים אלו הינם מעבירי תדרים נמוכים (Low Pass Filter), כלומר, מעבירים רק תדרים הנמוכים מערך סף מסוים. על המסננים רשום מספר תלת-ספרתי, מספר זה מציין את אורך הגל (ביחידות של mm) המתאים לתדר הסף של המסנן. אם נשים מסנן בין מקור האור לקתודה, התדר המקסימלי שיעבור יהיה תדר הסף של המסנן ולכן האנרגיה הקינטית המקסימלית של אלקטרון נפלט תהיה נתונה באמצעות משוואה (3).

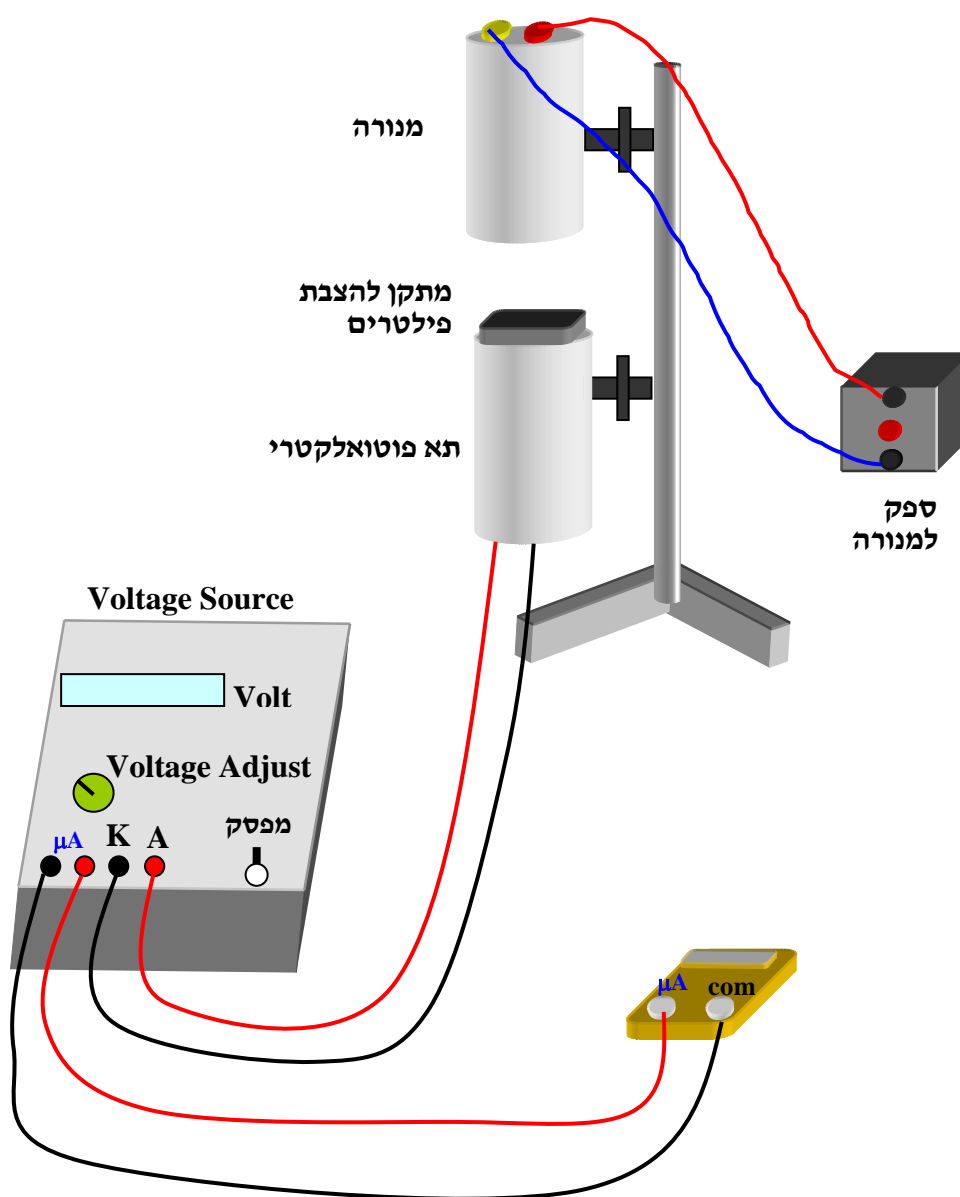
בניסוי זה שני חלקים, בחלק הראשון נשתמש במסנן בעל אורך הגל הארוך ביותר (אנרגיה נמוכה ביותר) ונבחן את האופין (תלות הזרם במתח) של השפופרת.

-האפקט הפוטואלקטרי-

בפרט נרצה לראות את תופעת זרם הרוויה. בחלק השני נתמקד במתח העצירה, נמדוד את מתח העצירה עבור המסננים השונים (תדרים מקסימליים שונים), ובעזרת משוואה (4) נחשב את ערכו של קבוע פלנק.

2.2 מדידת אופיין השפופרת

❖ הרכב את המעגל המתואר באיור 2. בעזרת הפוטנציומטר על כוון את מתח הספק לאפס והדלק את המנורה.



איור 2 : תיאור סכמאטי של מערכת הניסוי

- ❖ מצא את המסנן בעל אורך הגל הארוך ביותר (צבע אדום) והכנס אותו למקומו במקום המיועד לו.
- ❖ שנה את מתח הספק מ- $(-3V)$ ל $18V$ בצעדים של $1V$ ומדוד את הזרם. שרטט גרף של הזרם בתלות במתח. הסבר את הגרף שקיבלת.
- ❖ חזור על התהליכים הקודמים עבור שלושת הפילטרים הנוספים.

2.3 מדידת מתח העצירה וקבוע פלנק

- ◆ מתח העצירה נמדד כשירידים ממתח חיובי לשלילי של עקומת האפיון עד להתאפסות הזרם (יש להמתין כחצי דקה להתייצבות המערכת).
- שנה את מתח הספקי מ- $0V$ ל $-3V$ בקפיצות של $-0.1V$. מצא את המתח שגורם להפסקת הזרם ($I=0$) מתח זה הינו מתח העצירה.
- יש לחזור על המדידה עבור כל הפילטרים שברשותך.
- שרטט בגרף את מתח העצירה כתלות בתדר הסף של המסנן המצוין עליו, על פי משוואה (4) מתקבל גרף ליניארי. שיפוע הגרף הוא $\frac{h}{e}$. מדוד את השיפוע, הערך את השגיאה והשווה לערך הידוע של קבוע פלנק. מצא גם את פונקציית העבודה של הקתודה.

הערה:

באופן מעשי כשמקרינים אור על התא הפוטואלקטרי, האלקטרונים נפלטים מהקתודה ומהאנודה ואנו מודדים למעשה את הזרם השקול $I = I_C - I_A$. מאחר ואנודה יחסית קטנה במידותיה לקתודה הזרם האנודי בדרך כלל קטן. זאת הסיבה שבמתח שלילי ישנו זרם שלילי במעגל אשר כמעט מגיע לרוויה. זרם זה נגרם כתוצאה מאלקטרונים הנפלטים מהאנודה ונסחפים לעבר הקתודה. בניסוי הזה הזרם הקתודי גדול מאד ביחס לזרם האנודי ולכן אנו מזניחים את הזרם האנודי.